



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Σύντηξη δεδομένων υψηλού επιπέδου, από πολλαπλές πηγές
πληροφορίας, σε αυτο-οργανούμενα δίκτυα αυτοκινήτων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Παναγιώτης, Ν. Λυτρίβης

Αθήνα, Οκτώβριος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Σύντηξη δεδομένων υψηλού επιπέδου, από πολλαπλές πηγές
πληροφορίας, σε αυτο-οργανούμενα δίκτυα αυτοκινήτων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Παναγιώτης, Ν. Λυτρίβης

Συμβουλευτική Επιτροπή : Νικόλαος Ουζούνογλου

Δήμητρα-Θεοδώρα Κακλαμάνη

Άγγελος Αμδίτης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 21^η Οκτωβρίου 2010.

.....
Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Δήμητρα-Θεοδώρα Κακλαμάνη
Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....
Άγγελος Αμδίτης
Ερευνητής Α' ΕΠΙΣΕΥ

.....
Κωνσταντίνος Τζαφέστας
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Παναγιώτης Φράγκος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ανδρέας-Γεώργιος Σταφυλοπάτης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ιωάννης Τίγκελης
Αν. Καθηγητής ΕΚΠΑ

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

.....
Παναγιώτης, Ν. Λυτρίβης

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

Copyright © Παναγιώτης, Ν. Λυτρίβης, 2010.

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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνολογία των ευφυών συστημάτων μεταφοράς έχει αναπτυχθεί ραγδαία την τελευταία δεκαετία. Τα συστήματα αυτά έχουν ως στόχο την εκμετάλλευση των τεχνολογιών πληροφοριών και επικοινωνιών και την εφαρμογή τους στις μεταφορές. Ένας από τους κυριότερους στόχους των συστημάτων αυτών είναι η ενίσχυση της οδικής ασφάλειας.

Στα σύγχρονα συστήματα ενεργητικής ασφάλειας η σύντηξη δεδομένων (data fusion) από αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι στο αυτοκίνητο παίζει πολύ σημαντικό ρόλο. Η σύντηξη βοηθάει να ξεπεραστούν κάποιοι φυσικοί περιορισμοί των αισθητήρων, όπως είναι η περιορισμένη εμβέλεια και γωνία αντίληψης. Συνεπώς, η τοποθέτηση αισθητήρων περιμετρικά του αυτοκινήτου, και ο συνδυασμός των πληροφοριών που προέρχονται από αυτούς, μπορεί να αυξήσει σημαντικά την περιοχή αντίληψης γύρω από το αυτοκίνητο καθώς και την αξιοπιστία του συστήματος σε περίπτωση αστοχίας κάποιου αισθητήρα. Ωστόσο, κάποιοι σημαντικοί περιορισμοί, όπως π.χ. το γεγονός ότι το περιβάλλον αντίληψης δεν μπορεί να ξεπεράσει την εμβέλεια των αισθητήρων και ότι οι αισθητήρες δεν λειτουργούν καλά σε όλα τα περιβάλλοντα, παραμένουν και μετά τη σύντηξη των δεδομένων από τους αισθητήρες του αυτοκινήτου.

Τα τελευταία χρόνια μελετώνται τα συνεργατικά συστήματα, τα οποία έχουν ως στόχο με τη χρήση ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ των αυτοκινήτων και της υποδομής να ξεπεράσουν τα παραπάνω προβλήματα και να αυξήσουν την αντίληψη του οδηγού για το οδικό περιβάλλον ακόμα και μερικά χιλιόμετρα μακριά. Αυτοκίνητα τα οποία σχηματίζουν αυτό-οργανούμενα δίκτυα και «μιλούν» μεταξύ τους αποτελούν πραγματικά μια πρόκληση για το μέλλον και ένα ανοιχτό και ευρύ ερευνητικό πεδίο.

Σκοπός της διατριβής είναι η μελέτη και ανάπτυξη αλγορίθμων σύντηξης δεδομένων υψηλού επιπέδου λαμβάνοντας υπόψη τόσο δεδομένα από τους αισθητήρες του αυτοκινήτου όσο και πληροφορίες που προέρχονται από την επικοινωνία των αυτοκινήτων. Αρχικά, περιλαμβάνονται κάποια εισαγωγικά στοιχεία για τις τεχνικές σύντηξης δεδομένων και τα ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων και στη συνέχεια γίνεται μια επισκόπηση της αρχιτεκτονικής του συστήματος και παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες εφαρμογές και σενάρια τέτοιου είδους συστημάτων. Στη συνέχεια γίνεται μια ανάλυση των τεχνικών φιλτραρίσματος σε επίπεδο αυτοκινήτου και τονίζεται η σημασία του σωστού φιλτραρίσματος των δεδομένων πριν από την εκπομπή τους στο δίκτυο των αυτοκινήτων. Επιπλέον, υπολογίζεται η μελλοντική τροχιά του υποκείμενου αυτοκινήτου και των αυτοκινήτων που είναι εντός της εμβέλειάς του και γίνεται σύγκριση της αποτελεσματικότητας αυτού του υπολογισμού με και χωρίς τη χρήση ασύρματης επικοινωνίας. Τα σχετικά αποτελέσματα καταδεικνύουν την ανάγκη εκμετάλλευσης των δεδομένων που προέρχονται από το ασύρματο δίκτυο. Επίσης, στην παρούσα διατριβή εξετάζονται με τη βοήθεια της θεωρίας των δικτύων Bayes κάποια υψηλού επιπέδου συμβάντα όπως είναι η εκτίμηση της πυκνότητας της κυκλοφορίας ή η αντίληψη ομίχλης στην περιοχή που κινείται το υποκείμενο αυτοκίνητο. Τέλος, εξάγονται κάποια συμπεράσματα σχετικά με το αντικείμενο της διατριβής και γίνονται προτάσεις για μελλοντική ερευνητική εργασία.

Λέξεις κλειδιά: σύντηξη δεδομένων, συνεργατικά συστήματα, αυτό-οργανούμενα δίκτυα αυτοκινήτων, ασύρματη επικοινωνία, φιλτράρισμα δεδομένων, υπολογισμός μελλοντικής τροχιάς, συστήματα συλλογιστικής Dempster-Shafer, ασαφή συστήματα, δίκτυα Bayes, ευφυή συστήματα μεταφοράς, οδική ασφάλεια

ABSTRACT

The technology of intelligent transportation systems has grown rapidly over the last decade. These systems are designed to exploit the advances in information and communication technologies and apply them to transport. One of the main goals of these systems is to enhance road safety.

In modern active safety systems, fusion of data coming from different sensors installed in the vehicle plays an important role. The data fusion helps to overcome certain physical limitations of sensors, such as the limited range and field of view. Therefore, the combination of information from different sensors can significantly broaden the perception area around the vehicle and increase the reliability of the whole system in case of sensor failure. However, some significant limitations and drawbacks, such as the fact that the perception environment of the vehicle cannot go beyond the sensing range and the sensor systems cannot perform well in all environments, remain even after the fusion of data from different sensors installed in the vehicle.

In recent years cooperative systems are studied. These systems are designed to exploit wireless communication between vehicles and infrastructure to overcome the problems mentioned above and increase the perception of the road environment and extend the driver awareness even to some kilometers away. Vehicles that are forming ad hoc networks and “talk” to each other constitutes a significant future challenge and also a wide and open research area.

The objective of this thesis is the study and development of high level data fusion algorithms, taking into account data from vehicle sensors and information from the communication among vehicles. This thesis starts with a short introduction to the data fusion techniques and to the main principles of vehicular ad hoc networks. Then, an overview of the architecture of the system as well as some example applications and scenarios are examined. In the following, an analysis of filtering techniques is carried out and the importance of proper filtering of the data exchanged via the network is highlighted. Moreover, the future trajectory of both the ego vehicle and other vehicles within range are calculated and a comparison of the effectiveness of this calculation with and without the use of wireless communication is done. The obtained results demonstrate the need to exploit the data from the wireless network. Also in this thesis high level events, such as traffic density estimation or fog detection, using the theory of Bayesian networks are examined. Finally, conclusions on the subject of the thesis are drawn and suggestions for future research work in the field are made.

Keywords: data fusion, cooperative systems, vehicular ad-hoc networks, wireless communication, data filtering, path prediction, Dempster-Shafer reasoning systems, fuzzy systems, Bayesian networks, intelligent transportation systems, road safety

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εντάσσεται στα πλαίσια των ερευνητικών δραστηριοτήτων της ομάδας I-SENSE που υπάγεται στο εργαστήριο Μικροκυμάτων και Οπτικών Ινών (EMOI) της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ. Είναι μεν το αποτέλεσμα της προσωπικής εργασίας του συγγραφέα, αλλά η εκπόνησή της δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τη βοήθεια και τη στήριξη πολλών ανθρώπων. Επομένως, θα επιθυμούσα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλλαν σε αυτή την προσπάθεια, ελπίζοντας πως δεν θα ξεχάσω κάποιον. Είναι το πρώτο και μοναδικό κομμάτι της διατριβής όπου χρησιμοποιείται το πρώτο ενικό πρόσωπο διότι οι ευχαριστίες είναι αληθινές και προσωπικές.

Ολοκληρώνοντας λοιπόν την προσπάθειά μου αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον διευθυντή του εργαστηρίου και επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Ουζούνoglou για την ευκαιρία και τη δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω την παρούσα διατριβή. Επιπλέον, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την καθοδήγηση και τη στήριξη του καθώς και για την άριστη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια της διατριβής. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο της ομάδας Δρ. Άγγελο Αμδίτη για την αποφασιστική συμβολή του στην περάτωση της διατριβής και για τη στήριξη του σε όλο αυτό το διάστημα τόσο σε επιστημονικό όσο και σε προσωπικό επίπεδο. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τόσο τα μέλη της τριμελούς όσο και της επταμελούς επιτροπής που με τίμησαν με τη συμμετοχή και συμβολή τους, με υποστήριξαν και έδειξαν ενδιαφέρον και εμπιστοσύνη στην προσπάθειά μου αυτή. Θα ήθελα ακόμα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στους συνεργάτες μου για την ανιδιοτελή τους υποστήριξη, την επικοινωνιακή συνεργασία μας και τη συμβολή τους στην ερευνητική μου προσπάθεια. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Δρ. Ιωάννη Καρασεϊτανίδη, Δρ. Μανόλη Τσόγκα, τον υποψήφιο διδάκτορα Γεώργιο Θωμαΐδη καθώς και τους Βασίλη Καφφέ, Χριστίνα Κοτσιούρου και Κάτια Παγγιλέ.

Ευχαριστώ τους στενούς μου φίλους Χάρη Τσαρουχά, Γιώργο Μουστόγιαννη, Νίκο Ορφανό, Φάνη Παναγιωτακόπουλο, Κωνσταντίνο Κιντή, Χριστόφορο Τσαρουχά και Ειρήνη Μουστόγιαννη, για την υποστήριξη, την κατανόηση και τις ευχάριστες και δυσάρεστες στιγμές που μοιράστηκαν μαζί μου όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, το πιο μεγάλο ευχαριστώ ανήκει δικαιοματικά στην οικογένειά μου. Ευχαριστώ την αδερφή μου και τους γονείς μου για την ηθική και υλική υποστήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια, αλλά και για την πίστη τους στις προσπάθειες και στους κόπους μου. Η διατριβή αφιερώνεται στην οικογένειά μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT.....	7
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	9
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	13
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	15
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	17
Αντικείμενο της διατριβής.....	18
Δομή της διατριβής	19
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΝΤΗΞΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ & ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ.....	23
1.1 Εισαγωγή	23
1.2 Συστήματα σύντηξης δεδομένων έξυπνων αυτοκινήτων	25
1.2.1 Το αναθεωρημένο JDL μοντέλο.....	26
1.2.2 Αρχιτεκτονικές σύντηξης δεδομένων.....	27
1.2.3 Επεξεργασία σε επίπεδο αντικειμένου	30
1.2.4 Επεξεργασία σε επίπεδο κατάστασης.....	34
1.2.5 Εφαρμογές και παραδείγματα	38
1.3 Ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων	42
1.3.1 Χαρακτηριστικά του ασύρματου δικτύου αυτοκινήτων	43
1.3.2 Δραστηριότητες προτυποποίησης και Ευρωπαϊκά έργα	46
1.3.3 Δρομολόγηση	55
1.3.4 Ασφάλεια και προστασία προσωπικών δεδομένων.....	58
ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ & ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	63
2.1 Γενική επισκόπηση του συστήματος.....	63
2.2 Αρχιτεκτονική αναφοράς.....	65
2.2.1 Τοπικός Δυναμικός Χάρτης	66
2.2.2 Σύστημα Σύντηξης Δεδομένων	68
2.2.3 Ασύρματη Επικοινωνία	72
2.2.4 Μονάδα εντός του αυτοκινήτου	74
2.2.5 Μονάδα στην πλευρά του δρόμου.....	76
2.3 Εφαρμογές και σενάρια	77
2.3.1 Εφαρμογές ασφάλειας	78
2.3.2 Εφαρμογές αποδοτικότητας της κυκλοφορίας.....	82
2.3.3 Εφαρμογές ψυχαγωγίας, πληροφόρησης και λοιπές εφαρμογές.....	84
ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ	87
3.1 Τεχνικές φιλτραρίσματος.....	87
3.1.1 Μοντέλα κίνησης.....	88
3.1.2 Kalman φίλτρο	93
3.1.3 Εκτεταμένο Kalman φίλτρο	95
3.1.4 Unscented Kalman φίλτρο.....	98
3.2 Προτεινόμενο φίλτρο με χρήση ασαφούς λογικής	101
3.2.1 Ασαφής λογική	101
3.2.2 Προτεινόμενο φίλτρο	105
3.3 Μετρήσεις και αποτελέσματα.....	108
3.3.1 Διαδικασία προσομοιώσεων.....	108

3.3.2	Σύγκριση ΕΚF και UKF	110
3.3.3	Σύγκριση απλού UKF με το προτεινόμενο UKF	111
3.3.4	Εφαρμογή του προτεινόμενου φίλτρου σε συνεργατικές εφαρμογές	112
	<i>ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ</i>	115
4.1	Εισαγωγικά στοιχεία	115
4.2	Επισκόπηση του συστήματος	117
4.3	Ιχνηλασία και συσχέτιση δεδομένων	119
4.3.1	Ιχνηλασία	119
4.3.2	Συσχέτιση δεδομένων και σύντηξη	122
4.4	Πρόβλεψη μελλοντικής τροχιάς αυτοκινήτων	124
4.4.1	Θεωρία Dempster-Shafer	124
4.4.2	Αλγόριθμος πρόβλεψης μελλοντικής τροχιάς	130
4.5	Μετρήσεις και αποτελέσματα	134
4.5.1	Αποτελέσματα υπολογισμού μελλοντικής τροχιάς	135
4.5.2	Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγορίθμου στην ΕΕΒL	141
	<i>ΣΥΝΤΗΞΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ BAYES</i>	147
5.1	Εισαγωγή	147
5.2	Δίκτυα Bayes	151
5.2.1	Αιτιατά δίκτυα και d-διαχωρισμός	152
5.2.2	Ορισμός δικτύων Bayes	155
5.2.3	Κανόνας Αλυσίδας	156
5.2.4	Θέματα προς συζήτηση	156
5.3	Εκπαίδευση δικτύων Bayes	159
5.3.1	Εκπαίδευση δομής	159
5.3.2	Εκπαίδευση παραμέτρων	162
5.4	Συστήματα βασισμένα σε δίκτυα Bayes	163
5.4.1	Εκτίμηση πυκνότητας κυκλοφορίας	163
5.4.2	Ανίχνευση ομίχλης	166
	<i>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ</i>	173
6.1	Σχολιασμός αποτελεσμάτων και συμπεράσματα	173
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	176
	<i>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ I-SENSE</i>	179
	<i>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΒΟΗΘΗΤΙΚΟ Ι.Χ. ΓΙΑ ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ</i>	185
	<i>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</i>	189
	<i>ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ</i>	197

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ο «ηλεκτρονικός ορίζοντας» με χρήση επικοινωνιών και αισθητήρων.....	24
Εικόνα 2: Το JDL μοντέλο	26
Εικόνα 3: Το αναθεωρημένο JDL μοντέλο	27
Εικόνα 4: Κεντρική αρχιτεκτονική	29
Εικόνα 5: Κατανεμημένη αρχιτεκτονική.....	29
Εικόνα 6: Υβριδική αρχιτεκτονική.....	30
Εικόνα 7: Περιοχές κάλυψης για τις διάφορες εφαρμογές ασφαλείας.....	38
Εικόνα 8: Εξοπλισμένο αυτοκίνητο για εφαρμογές ασφάλειας σε διασταύρωση	40
Εικόνα 9: Εξοπλισμένο αυτοκίνητο για εφαρμογές ασφαλούς ταχύτητας και απόστασης.....	41
Εικόνα 10: Εξοπλισμένο αυτοκίνητο για εφαρμογές υποστήριξης διατήρησης λωρίδας	42
Εικόνα 11: Αυτοκίνητα που συνεργάζονται με άλλα αυτοκίνητα και με σταθμούς βάσης.....	43
Εικόνα 12: Η ιδέα του CALM στο υψηλότερο επίπεδο αφαίρεσης.....	52
Εικόνα 13: Γενική θεώρηση της αρχιτεκτονικής του συστήματος.....	64
Εικόνα 14: Διάγραμμα αρχιτεκτονικής αναφοράς	66
Εικόνα 15: Τα στρώματα του τοπικού δυναμικού χάρτη.....	67
Εικόνα 16: Σύστημα σύντηξης δεδομένων	68
Εικόνα 17: Μονάδα εντός του αυτοκινήτου.....	74
Εικόνα 18: Μονάδα στην πλευρά του δρόμου.....	76
Εικόνα 19: Εφαρμογές ασύρματης επικοινωνίας στα έξυπνα συστήματα μεταφορών.....	78
Εικόνα 20: Εφαρμογή προειδοποίησης εμπρόσθιας σύγκρουσης.....	79
Εικόνα 21: Εφαρμογή ασφάλειας σε διασταύρωση.....	80
Εικόνα 22: Εφαρμογή προειδοποίησης επικινδυνότητας τμήματος του οδοστρώματος	81
Εικόνα 23: Εφαρμογή εμπλουτισμένης καθοδήγησης και πλοήγησης	82
Εικόνα 24: Εφαρμογή βέλτιστης ταχύτητας μέχρι το φωτεινό σηματοδότη.....	83
Εικόνα 25: Εφαρμογή υποστήριξης συγχώνευσης κυκλοφορίας	84
Εικόνα 26: Unscented μετασχηματισμός	99
Εικόνα 27: Σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος ασαφούς εξαγωγής συμπεράσματος.....	104
Εικόνα 28: Συναρτήσεις μέλους για α) επιτάχυνση, β) γωνιακή ταχύτητα και γ) καμπυλότητα του δρόμου	107
Εικόνα 29: Φίλτρο του αυτοκινήτου για την τελική εκτίμηση της τρέχουσας κατάστασης.....	107
Εικόνα 30: Σφάλμα ταχύτητας EKF και UKF με χρήση CA και CTRA μοντέλων κίνησης.....	110
Εικόνα 31: Σφάλμα ταχύτητας για απλό και προτεινόμενο UKF	111
Εικόνα 32: Επισκόπηση του συστήματος για υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς.....	118
Εικόνα 33: Αλγόριθμος ιχνηλασίας του ραντάρ μακρινής εμβέλειας	120
Εικόνα 34: Αλγόριθμος διαχείρισης ιχνών	121
Εικόνα 35: Σύστημα συλλογιστικής Dempster-Shafer	129
Εικόνα 36: Διαδικασία σύντηξης με Dempster-Shafer	130
Εικόνα 37: Σύστημα συλλογιστικής Dempster-Shafer για επιλογή μοντέλου κίνησης.....	134
Εικόνα 38: Υποκείμενο αυτοκίνητο (αυτοκίνητο A).....	135
Εικόνα 39: Διαδρομή για αποτίμηση του αλγορίθμου υπολογισμού μελλοντικής τροχιάς.....	136
Εικόνα 40: Διαδικασία αποτίμησης του αλγορίθμου υπολογισμού μελλοντικής τροχιάς	136
Εικόνα 41: Συμπεριφορά του αλγορίθμου στις μεταβάσεις.....	139
Εικόνα 42: Πίστα της CRF στο Ορμπασάνο.....	140
Εικόνα 43: Οπτικός έλεγχος ορθότητας της τροχιάς.....	140

Εικόνα 44: Τα πιο συνηθισμένα ατυχήματα σύμφωνα με τον NHTSA [95]	142
Εικόνα 45: Παραδείγματα σεναρίου της εφαρμογής EEBL.....	143
Εικόνα 46: Σενάρια δοκιμών για την εφαρμογή EEBL	144
Εικόνα 47: Σειριακή σύνδεση.....	152
Εικόνα 48: Αποκλίνουσα σύνδεση	153
Εικόνα 49: Συγκλίνουσα σύνδεση	153
Εικόνα 50: Αιτιατό δίκτυο για πρόβλημα εκκίνησης αυτοκινήτου	154
Εικόνα 51: Παραδείγματα συγκλίνουσας σύνδεσης	154
Εικόνα 52: Γενική περιγραφή του θορυβώδους-ή.....	159
Εικόνα 53: Δομή δικτύου Bayes για εκτίμηση πυκνότητας κυκλοφορίας	164
Εικόνα 54: Δομή δικτύου Bayes για ανίχνευση ομίχλης	167
Εικόνα 55: Είσοδος υποκείμενου αυτοκινήτου σε περιοχή όπου επικρατεί ομίχλη	168
Εικόνα 56: Έξοδος υποκείμενου αυτοκινήτου από περιοχή όπου επικρατεί ομίχλη.....	169
Εικόνα 57: Ερευνητικό αυτοκίνητο I-SENSE.....	179
Εικόνα 58: USB κάμερες & Firewall κάμερα	180
Εικόνα 59: Αισθητήρες αντίληψης οδικού περιβάλλοντος.....	181
Εικόνα 60: Η κεραία του διαφορικού GPS (DGPS)	181
Εικόνα 61: Υπολογιστικές μονάδες εντός του αυτοκινήτου	182
Εικόνα 62: Τοπολογία των αισθητήρων του ερευνητικού αυτοκινήτου.....	183
Εικόνα 63: Πλατφόρμα αυτοκινήτου	184
Εικόνα 64: Βοηθητικό I.X. αυτοκίνητο.....	185
Εικόνα 65: Αισθητήρας μέτρησης ταχύτητας.....	186
Εικόνα 66: Απλό USB GPS και κεραία ασυρμάτου δικτύου	186
Εικόνα 67: Αισθητήρας μέτρησης γωνιακής ταχύτητας και επιτάχυνσης.....	187

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα κεντρικής και κατανεμημένης αρχιτεκτονικής	28
Πίνακας 2: Τυπική έξοδος της διαδικασίας διαβάσματος δεδομένων	69
Πίνακας 3: Τυπική έξοδος της ανάλυσης σε επίπεδο αντικειμένου	70
Πίνακας 4: Τυπική έξοδος της ανάλυσης σε επίπεδο κατάστασης.....	72
Πίνακας 5: Περιορισμοί για τη δημιουργία μηνυμάτων.....	73
Πίνακας 6: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα για UKF και EKF φίλτρα με χρήση των μοντέλων CA και CTRA.....	110
Πίνακας 7: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα για απλό και προτεινόμενο UKF φίλτρο.....	112
Πίνακας 8: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα με και χωρίς τη χρήση ασύρματης επικοινωνίας.....	112
Πίνακας 9: Αποτελέσματα μελλοντικής τροχιάς για το υποκείμενο αυτοκίνητο (4 sec)	137
Πίνακας 10: Αποτελέσματα μελλοντικής τροχιάς με και χωρίς VANET (4 sec).....	137
Πίνακας 11: Αξιοπιστία της μελλοντικής τροχιάς στο χρόνο	138
Πίνακας 12: Αποτελέσματα υπολογισμού μελλοντικής τροχιάς στο SAFESPOT (2 sec).....	141
Πίνακας 13: Αποτελέσματα ειδοποίησης οδηγού	145
Πίνακας 14: Μέγεθος πίνακα πιθανότητας με βάση τον αριθμό των γονέων μιας μεταβλητής....	158
Πίνακας 15: Αποτελέσματα εκτίμησης πυκνότητας κυκλοφορίας	166
Πίνακας 16: Αποτελέσματα ανίχνευσης ομίχλης (είσοδος σε περιοχή με ομίχλη).....	169
Πίνακας 17: Αποτελέσματα ανίχνευσης ομίχλης (έξοδος από περιοχή με ομίχλη).....	170
Πίνακας 18: Θέση αισθητήρων στο ερευνητικό αυτοκίνητο	183

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα ευφυή συστήματα μεταφοράς βρίσκονται στο επίκεντρο της ερευνητικής δραστηριότητας στην Ευρώπη και σε όλο τον κόσμο τις τελευταίες δεκαετίες. Ο όρος «ευφυή συστήματα μεταφοράς» σημαίνει την εφαρμογή των τεχνολογιών πληροφοριών και επικοινωνιών στις μεταφορές. Σύμφωνα με το πλάνο δράσης της Ευρωπαϊκής Ένωσης στόχος είναι μέσα στα επόμενα χρόνια οι μεταφορές να είναι ασφαλέστερες, καθαρότερες (μειωμένες εκπομπές CO₂), αποτελεσματικότερες και ενεργειακά αποδοτικές. Ωστόσο, είναι σαφές ότι για να επιτευχθούν οι συγκεκριμένοι στόχοι χρειάζονται καινοτόμες λύσεις και απαιτείται σημαντική ερευνητική δραστηριότητα.

Προς αυτή την κατεύθυνση η Ευρωπαϊκή Ένωση προωθεί την ανάπτυξη και την εφαρμογή των συνεργατικών συστημάτων, τα οποία επιτρέπουν στα αυτοκίνητα να επικοινωνούν, μέσω ασύρματης δικτύωσης, με άλλα αυτοκίνητα, με την οδική υποδομή και με τα κέντρα διαχείρισης της κυκλοφορίας. Τα συνεργατικά συστήματα αποτελούν την επόμενη γενιά των ευφυών συστημάτων μεταφοράς. Μάλιστα, στις ΗΠΑ, στην Ιαπωνία και σε κάποια κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν αναπτυχθεί πειραματικά κάποιες συνεργατικές πλατφόρμες που θα συμβάλλουν στη βελτίωση τόσο της ασφάλειας όσο και της αποτελεσματικότητας (π.χ. μείωση κυκλοφοριακής συμφόρησης) στα οδικά δίκτυα. Επιπλέον, η τεχνολογία αυτή μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην ανάπτυξη των πολύ-τροπικών επίγειων μεταφορών μεγιστοποιώντας παράλληλα και την αποτελεσματικότητα της μεταφοράς φορτίων.

Η ραγδαία αυτή ανάπτυξη των συνεργατικών συστημάτων οφείλεται κυρίως στους φυσικούς περιορισμούς των προηγμένων συστημάτων υποστήριξης του οδηγού που βασίζονται αποκλειστικά σε αισθητήρες τοποθετημένους στο υπό εξέταση αυτοκίνητο. Ενδεικτικά παραδείγματα τέτοιων περιορισμών είναι τα ακόλουθα: το περιβάλλον αντίληψης δεν μπορεί να ξεπεράσει την εμβέλεια των αισθητήρων, οι αισθητήρες δεν λειτουργούν καλά σε όλα τα περιβάλλοντα και επηρεάζονται από τις καιρικές συνθήκες, σε μερικά σενάρια δεν υπάρχει αρκετός χρόνος για να αντιδράσει ο οδηγός ακόμα και όταν το σύστημα ανιχνεύσει τον κίνδυνο, το κόστος αγοράς αισθητήρων είναι μεγάλο. Η εισαγωγή της ασύρματης επικοινωνίας στα αυτοκίνητα έχει ως στόχο να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί και να διευρυνθεί ο ορίζοντας αντίληψης του εκάστοτε οδηγού ακόμα και μερικά χιλιόμετρα μακριά. Επιπλέον, με τη χρήση των τεχνολογιών ασύρματης δικτύωσης μπορούν να αναπτυχθούν εφαρμογές οι οποίες δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθούν παλαιότερα, π.χ. διαδίκτυο στο αυτοκίνητο, συνεργατική δρομολόγηση αυτοκινήτων και λοιπές εφαρμογές.

Υπάρχει έντονο ενδιαφέρον στον τομέα των αυτοκινήτων τα οποία συνεργάζονται μεταξύ τους καθώς και με την υποδομή λόγω της τεχνικής πρόοδου και των αναγνωρισμένων οφελών που μπορεί να προσφέρει μία τέτοια συνεργασία. Αυτοκίνητα τα οποία σχηματίζουν αυτό-οργανούμενα δίκτυα και «μιλούν» μεταξύ τους αποτελούν πραγματικά μια πρόκληση για το μέλλον και ένα ανοιχτό και ευρύ ερευνητικό πεδίο. Επί του παρόντος, τα συνεργατικά συστήματα δεν έχουν φθάσει ακόμα στην αγορά. Επομένως, η τεχνολογική στάθμιση αποτελείται κυρίως από προγράμματα και πρωτοβουλίες τόσο σε εθνικό όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο καθώς και από τις δραστηριότητες προτυποποίησης. Περισσότερες λεπτομέρειες για αυτές τις

δραστηριότητες και τις πρωτοβουλίες θα δοθούν στο πρώτο κεφάλαιο που αποτελεί και την εισαγωγή της παρούσας εργασίας. Στην εισαγωγή περιλαμβάνεται επίσης μία ανασκόπηση στα συστήματα σύντηξης δεδομένων και στις διαφορετικές αρχιτεκτονικές τους. Επιπλέον, παρατίθενται κάποιες γενικές πληροφορίες σχετικά με τα ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων, όπως είναι η δρομολόγηση, η ασφάλεια και οι τρέχουσες ερευνητικές δραστηριότητες σε τέτοιου είδους δίκτυα. Στη συνέχεια, γίνεται μια επισκόπηση του δικτύου των αυτοκινήτων και της αρχιτεκτονικής αναφοράς και αναλύονται κάποια βασικά τμήματα του συστήματος. Επίσης, αναλύονται οι διαφορετικές κατηγορίες εφαρμογών και τα αντίστοιχα σενάρια που βρίσκουν εφαρμογή σε τέτοιου είδους δίκτυα αυτοκινήτων. Στην συνέχεια, περιλαμβάνονται αλγόριθμοι οι οποίοι αφορούν το φιλτράρισμα των δεδομένων εντός του αυτοκινήτου και τον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς των αυτοκινήτων λαμβάνοντας υπόψη πληροφορίες από το ασύρματο δίκτυο. Τέλος, παρουσιάζονται κάποιοι άλλοι αλγόριθμοι που στοχεύουν στην εκτίμηση της πυκνότητας της κυκλοφορίας καθώς και στην ανίχνευση ομίχλης γύρω από το προς εξέταση αυτοκίνητο.

Συνοψίζοντας, η παρούσα διατριβή συνεισφέρει προς την κατεύθυνση της αύξησης της ασφάλειας στις μεταφορές μέσα από τη θεωρητική μελέτη, σχεδίαση και ανάπτυξη αλγορίθμων για την υποβοήθηση του οδηγού σε συνεργατικό περιβάλλον. Έμμεσα αυτό έχει θετικό αντίκτυπο και σε άλλους στόχους, όπως είναι η αύξηση της αποδοτικότητας. Σημαντικό κομμάτι της εργασίας αφορά στην υλοποίηση και έλεγχο των αλγορίθμων αυτών σε πραγματικά συστήματα οδικής ασφάλειας που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια των ερευνητικών δραστηριοτήτων της ομάδας I-SENSE που υπάγεται στο εργαστήριο Μικροκυμάτων και Οπτικών Ιών (EMOI) της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ. Ο συγγραφέας της εργασίας αυτής ασχολείται ερευνητικά με το ευρύτερο θέμα της σύντηξης δεδομένων σε συνεργατικά συστήματα από τον Σεπτέμβριο του 2006 οπότε και εντάχθηκε στο ερευνητικό δυναμικό της ομάδας I-SENSE.

Αντικείμενο της διατριβής

Αντικείμενο της διατριβής είναι η μελέτη και η ανάπτυξη αλγορίθμων σύντηξης δεδομένων υψηλού επιπέδου σε αυτο-οργανούμενα δίκτυα αυτοκινήτων. Οι θεμελιώδεις πυλώνες πάνω στους οποίους στηρίζεται η διατριβή και οι οποίοι αναλύονται στη συνέχεια είναι α) η σύντηξη δεδομένων υψηλού επιπέδου και β) τα αυτο-οργανούμενα δίκτυα αυτοκινήτων ή αλλιώς τα συνεργατικά συστήματα.

Η σύντηξη δεδομένων διακρίνεται σε χαμηλού και υψηλού επιπέδου ανάλογα με το που γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων από τους αισθητήρες ή τις υπόλοιπες πηγές πληροφορίας (π.χ. ψηφιακοί χάρτες). Στη σύντηξη χαμηλού επιπέδου γίνεται στην ουσία η προ-επεξεργασία των δεδομένων και η ιχνηλασία των αντικειμένων που βρίσκονται στο οδικό περιβάλλον. Στη σύντηξη υψηλού επιπέδου ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι σχέσεις μεταξύ των αντικειμένων (αυτοκίνητα, εμπόδια, λωρίδες, όρια δρόμου) που προέρχονται από το χαμηλό επίπεδο και γίνεται μια ανάλυση της παρούσας κατάστασης με στόχο να γίνει καλύτερα κατανοητή. Σε αυτό το επίπεδο, που είναι και το επίκεντρο της παρούσας διατριβής, γίνεται μια προσπάθεια να απαντηθούν ερωτήματα του τύπου «ποια είναι η μελλοντική τροχιά των αυτοκινήτων στο

οδικό περιβάλλον;», «σε ποια λωρίδα βρίσκεται το τάδε αυτοκίνητο;», «αν συνεχίσω με αυτή την ταχύτητα στην επικείμενη στροφή θα κρατηθώ στο δρόμο;», «πόσο πυκνή είναι η κυκλοφορία;» κλπ. Όπως φαίνεται και από τις παραπάνω ερωτήσεις η σύντηξη δεδομένων υψηλού επιπέδου είναι πιο κοντά στην ανθρώπινη αντίληψη καθώς γίνεται προσπάθεια να εντοπιστούν και να αποσαφηνιστούν οι σχέσεις των διαφορετικών αντικειμένων του οδικού περιβάλλοντος. Το αποτέλεσμα της σύντηξης υψηλού επιπέδου χρησιμοποιείται άμεσα από τις ενδιαφερόμενες εφαρμογές και από τα συστήματα λήψης απόφασης.

Παρόλα αυτά, η χρήση δεδομένων από αισθητήρες και πηγές πληροφορίας που είναι τοποθετημένες εντός του αυτοκινήτου δεν αρκεί σε αρκετές περιπτώσεις, καθώς όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως υπάρχουν κάποιοι εγγενείς περιορισμοί, όπως είναι η μειωμένη ακτίνα δράσης των αισθητήρων. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητες πληροφορίες που προέρχονται από το ασύρματο δίκτυο που σχηματίζουν τα γειτονικά αυτοκίνητα μεταξύ τους αλλά και με την υποδομή. Οι πληροφορίες που ανταλλάσσονται και η συνεργασία των κόμβων ενός τέτοιου δικτύου δίνουν τη δυνατότητα για την πραγματοποίηση εφαρμογών που δίχως την ασύρματη επικοινωνία θα ήταν αδύνατες, ενώ ταυτόχρονα με την προσθήκη των ασύρματων μηνυμάτων βελτιώνεται και η αποτελεσματικότητα των υπαρχόντων προηγμένων συστημάτων υποβοήθησης του οδηγού.

Απώτερος στόχος των αλγορίθμων σύντηξης σε συνεργατικό περιβάλλον που αναφέρθηκαν προηγουμένως είναι η ενίσχυση της αντίληψης του οδηγού πέρα από το οπτικό του πεδίο και κατ' επέκταση η μείωση των τροχαίων ατυχημάτων και η βελτίωση της οδικής ασφάλειας.

Δομή της διατριβής

Η διδακτορική διατριβή είναι οργανωμένη συνολικά σε έξι κεφάλαια, τα οποία περιγράφονται συνοπτικά στις παραγράφους που ακολουθούν. Επιπλέον, στο τέλος της διατριβής υπάρχει παράρτημα στο οποίο περιλαμβάνονται κάποιες πληροφορίες για τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε στη διάρκεια των μετρήσεων για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στις τεχνικές σύντηξης δεδομένων και στα ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων. Το κεφάλαιο αυτό αποσκοπεί στην εξοικείωση του αναγνώστη με τις τρέχουσες ερευνητικές δραστηριότητες στον τομέα των ευφών συστημάτων μεταφοράς. Στόχος εδώ δεν είναι η σε βάθος ανάλυση των τεχνικών σύντηξης και της δικτύωσης των αυτοκινήτων, αλλά η επεξήγηση κάποιων βασικών εννοιών οι οποίες θα χρησιμεύσουν στον αναγνώστη ώστε να κατανοήσει τα επόμενα κεφάλαια. Αρχικά, περιγράφεται το πιο διαδεδομένο μοντέλο για τη σύντηξη δεδομένων καθώς και οι διάφορες αρχιτεκτονικές σύντηξης. Έμφαση δίνεται στα επίπεδα επεξεργασίας αντικειμένου και κατάστασης του παραπάνω μοντέλου. Στη συνέχεια αναλύονται τα ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων και τα χαρακτηριστικά τους και αναφέρονται οι δραστηριότητες προτυποποίησης και τα αντίστοιχα ερευνητικά ευρωπαϊκά έργα. Τέλος, περιγράφονται συνοπτικά κάποιοι αλγόριθμοι δρομολόγησης και δίνονται κάποια στοιχεία για τη διαχείριση της ασφάλειας και της προστασίας προσωπικών δεδομένων σε αυτά τα δίκτυα.

Αντικείμενο του *δεύτερου κεφαλαίου* είναι η παρουσίαση μιας αρχιτεκτονικής αναφοράς ενός ασύρματου δικτύου αυτοκινήτων και η ανάλυση των διαφορετικών κατηγοριών εφαρμογών που προκύπτουν. Αρχικά, γίνεται μια γενική επισκόπηση του συστήματος των αυτοκινήτων που επικοινωνούν ασύρματα μεταξύ τους και παρουσιάζονται οι διαφορετικοί τομείς του. Ακολούθως, παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική αναφοράς ενός κόμβου του δικτύου και αναλύονται τα διαφορετικά τμήματά της. Ιδιαίτερα σημαντικά τμήματα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι ο τοπικός δυναμικός χάρτης και το σύστημα σύντηξης δεδομένων. Επιπλέον δίνεται και ένα παράδειγμα υλοποίησης της αρχιτεκτονικής αυτής σε κόμβο-αυτοκίνητο και σε κόμβο-υποδομή. Τέλος, το κεφάλαιο αυτό κλείνει με την κατηγοριοποίηση των εφαρμογών σε εφαρμογές ασφάλειας, αποδοτικότητας κυκλοφορίας και ψυχαγωγίας, ενώ ταυτόχρονα δίνονται και κάποια παραδείγματα για κάθε κατηγορία δείχνοντας έτσι το ευρύ πεδίο εφαρμογών που ανοίγεται στον τομέα των ευφών συστημάτων μεταφορών με τη χρήση ασύρματης δικτύωσης.

Στο *τρίτο κεφάλαιο* περιγράφονται οι τεχνικές και οι αλγόριθμοι για το φιλτράρισμα των δεδομένων σε επίπεδο αυτοκινήτου με τελικό στόχο οι πληροφορίες που εκπέμπει το κάθε αυτοκίνητο στο δίκτυο να είναι απαλλαγμένες από το θόρυβο. Αρχικά, γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων κίνησης που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και των τεχνικών φιλτραρίσματος που στηρίζονται στον αλγόριθμο του Kalman. Στη συνέχεια προτείνεται ένα τροποποιημένο φίλτρο το οποίο λαμβάνει υπόψη την καμπυλότητα του δρόμου, τη γωνιακή ταχύτητα και την επιτάχυνση του αυτοκινήτου για να μοντελοποιήσει την κίνησή του με πιο ρεαλιστικό τρόπο. Ταυτόχρονα παρατίθεται και μια μικρή εισαγωγή στη θεωρία των ασαφών συστημάτων καθώς ένα ασαφές σύστημα χρησιμοποιείται για την επιλογή του μοντέλου κίνησης στο τροποποιημένο φίλτρο. Τέλος, παρουσιάζονται αποτελέσματα στα οποία αποδεικνύεται ότι το προτεινόμενο φίλτρο είναι ανώτερο σε επίδοση τόσο από το εκτεταμένο Kalman όσο και από το απλό Unscented Kalman που χρησιμοποιούν ένα μόνο προκαθορισμένο μοντέλο κίνησης. Το πλεονέκτημα του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι ότι εκμεταλλεύεται τα δεδομένα από τους ψηφιακούς χάρτες και τις πληροφορίες που αφορούν τη δυναμική κατάσταση του αυτοκινήτου ώστε να επιλέξει τα καταλληλότερα μοντέλα κίνησης και να τα συνδυάσει με τελικό στόχο τη μείωση των σφαλμάτων του φιλτραρίσματος.

Στο *τέταρτο κεφάλαιο* γίνεται χρήση των φιλτραρισμένων πληροφοριών που προκύπτουν από το φίλτρο του προηγούμενου κεφαλαίου ώστε να υπολογιστεί η μελλοντική τροχιά τόσο του υποκείμενου αυτοκινήτου όσο και των υπόλοιπων αυτοκινήτων στο οδικό περιβάλλον. Το κεφάλαιο αυτό αρχίζει με κάποια εισαγωγικά στοιχεία και συνεχίζει με επισκόπηση της αρχιτεκτονικής του συστήματος, η οποία αναλύθηκε εκτενώς στο δεύτερο κεφάλαιο. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη αναφορά στις τεχνικές ιχνηλασίας και συσχέτισης δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων. Ακολούθως, παρουσιάζεται ο αλγόριθμος για τον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς και περιγράφεται συνοπτικά η θεωρία Dempster-Shafer πάνω στην οποία βασίζεται. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την αξιολόγηση του αλγορίθμου τα οποία δείχνουν με σαφήνεια τα σημαντικά κέρδη που προκύπτουν από τη χρήση ασύρματων πληροφοριών στον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς. Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν από μετρήσεις που έγιναν με δύο διαφορετικά συστήματα: α) με τη χρήση ενός ερευνητικού αυτοκινήτου και ενός συμβατικού I.X. αυτοκινήτου και β) με τη χρήση δύο αυτοκινήτων επίδειξης του Ερευνητικού Κέντρου της FIAT στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος SAFESPOT.

Το *πέμπτο κεφάλαιο* περιλαμβάνει αρχικά μια σύντομη εισαγωγή στα δίκτυα Bayes και στη θεωρία τους που είναι απαραίτητα ώστε να κατανοήσει ο αναγνώστης το υπόλοιπο κεφάλαιο. Τα δίκτυα αυτά αποτελούν τη βάση για την ανάπτυξη πολλών διαφορετικών εφαρμογών σε ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων. Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού περιγράφονται τα δύο συστήματα σύντηξης δεδομένων υψηλού επιπέδου που αναπτύσσονται με τη βοήθεια των δικτύων Bayes: α) η μονάδα εκτίμησης της πυκνότητας της κυκλοφορίας και β) η μονάδα ανίχνευσης ομίχλης. Τέλος, δίνονται κάποια αποτελέσματα τα οποία δείχνουν την ορθή λειτουργία από την εφαρμογή αυτών των συστημάτων σε αυτο-οργανούμενα δίκτυα αυτοκινήτων.

Τέλος, στο *έκτο κεφάλαιο* σχολιάζονται τα αποτελέσματα των προηγούμενων κεφαλαίων, δίνονται τα συνολικά συμπεράσματα που εξάγονται από τη διατριβή, ενώ ταυτόχρονα γίνονται και προτάσεις για μελλοντική έρευνα πάνω στα θέματα της διατριβής.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΝΤΗΞΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ & ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ

Το κεφάλαιο αυτό χρησιμεύει ως μία εισαγωγή στις τεχνικές σύντηξης δεδομένων και στα ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων, και αποσκοπεί στην εξοικείωση του αναγνώστη με τις τρέχουσες ερευνητικές δραστηριότητες στον τομέα των ευφών συστημάτων μεταφοράς. Στόχος δεν είναι η σε βάθος ανάλυση των τεχνικών σύντηξης και της δικτύωσης των αυτοκινήτων, αλλά η επεξήγηση κάποιων βασικών εννοιών οι οποίες θα χρησιμεύσουν στον αναγνώστη ώστε να κατανοήσει τα επόμενα κεφάλαια. Αρχικά, θα περιγραφεί το πιο διαδεδομένο μοντέλο για τη σύντηξη δεδομένων καθώς και οι διάφορες αρχιτεκτονικές σύντηξης. Έμφαση θα δοθεί στα επίπεδα επεξεργασίας αντικειμένου και κατάστασης του παραπάνω μοντέλου. Επιπλέον, θα αναλυθούν τα ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων και θα αναφερθούν τα χαρακτηριστικά ενός τέτοιου δικτύου, οι δραστηριότητες προτυποποίησης και τα αντίστοιχα ερευνητικά ευρωπαϊκά έργα. Τέλος, θα περιγραφούν συνοπτικά κάποιοι αλγόριθμοι δρομολόγησης και θα δοθούν κάποια στοιχεία για τη διαχείριση της ασφάλειας και της προστασίας προσωπικών δεδομένων σε αυτά τα δίκτυα.

1.1 Εισαγωγή

Την τελευταία δεκαετία, εξαιτίας των αυξημένων θανάτων και τραυματισμών που προέρχονται από τροχαία ατυχήματα αλλά και των υλικών ζημιών που ανέρχονται σε πολλά δισεκατομμύρια €, έχει εντατικοποιηθεί η έρευνα γύρω από θέματα ασφάλειας σε αυτοκίνητα. Τα θανατηφόρα οδικά ατυχήματα στην ΕΕ των 27 μειώθηκαν κατά περισσότερο από 27% από το 2001, όταν η Επιτροπή δημοσίευσε τη λευκή βίβλο για την ευρωπαϊκή πολιτική μεταφορών¹. Το ευρωπαϊκό πρόγραμμα δράσης για την οδική ασφάλεια² και η πρωτοβουλία για τα ευφύη αυτοκίνητα³ είχαν σημαντικό αντίκτυπο στην επίτευξη της θετικής αυτής εξέλιξης, και αναμένεται ότι θα συνεχίσουν να συμβάλλουν περαιτέρω στην επίτευξη του στόχου της μείωσης των θανατηφόρων ατυχημάτων. Ωστόσο, με περίπου 39.000 νεκρούς και

¹ COM(2001) 370 – «Λευκή βίβλος - Η ευρωπαϊκή πολιτική μεταφορών με ορίζοντα το έτος 2010: η ώρα των επιλογών».

² COM(2003) 311 – «Ευρωπαϊκό πρόγραμμα δράσης για την οδική ασφάλεια - Μείωση στην Ευρωπαϊκή Ένωση του αριθμού των θυμάτων σε τροχαία ατυχήματα κατά το ήμισυ από σήμερα έως το 2010 : ένα ζήτημα που μας αφορά όλους».

³ COM(2006) 59 – Σχετικά με την πρωτοβουλία για τα ευφύη οχήματα «Ευαισθητοποίηση του κοινού για τη σημασία των ΤΠΕ για ευφύστερα, ασφαλέστερα και καθαρότερα οχήματα». COM(2007) 541 – «Προς ασφαλέστερη, καθαρότερη και αποδοτικότερη κινητικότητα στην Ευρώπη. Η πρώτη έκθεση σχετικά με τα νοήμονα αυτοκίνητα».

περισσότερους από 1,7 εκατομμύρια τραυματίες το 2008 στους δρόμους της Ευρώπης, απαιτείται η ανάληψη περαιτέρω δράσης.

Η ασφάλεια στον τομέα των μεταφορών διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες, στην παθητική και στην ενεργητική ασφάλεια. Η παθητική ασφάλεια αφορά κυρίως στον περιορισμό των συνεπειών ενός ατυχήματος αφού έχει επέλθει η σύγκρουση (π.χ. άνοιγμα αερόσακου, ζώνες ασφαλείας). Η έρευνα στον τομέα της παθητικής ασφάλειας έχει φτάσει σε καλό σημείο αλλά δεν μπορεί να βοηθήσει στην πρόληψη των ατυχημάτων. Για το λόγο αυτό οι επιστήμονες έχουν στραφεί κυρίως στην έρευνα που αφορά την ενεργητική ασφάλεια.

Η ενεργητική ασφάλεια με τη σειρά της αφορά στην πρόληψη των ατυχημάτων και μπορεί να διακριθεί σε δύο υποκατηγορίες. Στην πρώτη συναντάμε τα αυτοκίνητα που είναι εξοπλισμένα με ποικίλους αισθητήρες (π.χ. ραντάρ, υπέρυθρες κάμερες, σαρωτές λέιζερ) για εντοπισμό κινούμενων αντικειμένων, εμποδίων, ανίχνευση ορίων του δρόμου κλπ. Έτσι επεκτείνεται ο ορίζοντας της αντίληψης του οδηγού για το οδικό περιβάλλον. Λόγω όμως φυσικών περιορισμών και περιορισμών των αισθητήρων (π.χ. εμβέλεια των αισθητήρων, αποκλεισμός λόγω εμποδίων) υπάρχει ανάγκη για διαφορετικού είδους τεχνολογίες. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια τάση εκμετάλλευσης των ασύρματων επικοινωνιών σε εφαρμογές αυτοκινήτων. Αυτοκίνητα που επικοινωνούν μεταξύ τους και σχηματίζουν αυτό-οργανούμενα δίκτυα ίσως φανούν χρήσιμα σε μελλοντικές εφαρμογές ασφαλείας, που δεν μπορούν να καλυφθούν προς το παρόν, λόγω των φυσικών περιορισμών των αισθητήρων πάνω στο αυτοκίνητο. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει η δεύτερη υποκατηγορία ενεργητικής ασφάλειας στην οποία περιλαμβάνεται η επικοινωνία των αυτοκινήτων η οποία μπορεί να χωριστεί σε επικοινωνία αυτοκινήτου με αυτοκίνητο και σε επικοινωνία αυτοκινήτου με σταθερό σταθμό βάσης.

Με τη χρήση των ασυρμάτων τεχνολογιών ο «ηλεκτρονικός ορίζοντας» και η ενημέρωση του οδηγού μπορούν να επεκταθούν ακόμα και μερικά χιλιόμετρα μακριά. Επομένως, ο χρόνος που έχει ο οδηγός στη διάθεσή του για να αντιδράσει, σε επικείμενο κίνδυνο, αυξάνεται σημαντικά με αποτέλεσμα τη δυνατότητα ουσιαστικής αντιμετώπισης του κινδύνου.



Εικόνα 1: Ο «ηλεκτρονικός ορίζοντας» με χρήση επικοινωνιών και αισθητήρων

Στην Εικόνα 1 φαίνεται ο «ηλεκτρονικός ορίζοντας» του οδηγού με τη χρήση αισθητήρων που είναι εγκατεστημένοι στο αυτοκίνητο καθώς και ο διευρυμένος ορίζοντας σε περίπτωση ύπαρξης και ασύρματης επικοινωνίας. Γίνεται αντιληπτό πως ο οδηγός έχει τη δυνατότητα έγκαιρης αντίδρασης σε επικείμενο κίνδυνο, καθώς θα είναι εκ των προτέρων ενήμερος για το τι γίνεται στο οδικό περιβάλλον.

1.2 Συστήματα σύντηξης δεδομένων έξυπνων αυτοκινήτων

Η σύντηξη δεδομένων από αισθητήρες παίζει σημαντικό ρόλο τόσο στα σύγχρονα όσο και στα μελλοντικά συστήματα ενεργητικής ασφάλειας αυτοκινήτων. Η ανάπτυξη νέων προηγμένων αισθητήρων δεν επαρκεί χωρίς την χρησιμοποίηση προηγμένων τεχνικών επεξεργασίας σήματος, όπως είναι οι μέθοδοι σύντηξης δεδομένων. Ένας αισθητήρας από μόνος του δεν μπορεί να ξεπεράσει συγκεκριμένους φυσικούς περιορισμούς, όπως για παράδειγμα η εμβέλεια (range) και το πεδίο αντίληψης (field of view), που επιβάλλουν οι φυσικές αρχές λειτουργίας του. Επομένως συνδυάζοντας πληροφορίες που προέρχονται από διαφορετικούς αισθητήρες τοποθετημένους περιμετρικά του αυτοκινήτου διευρύνεται η περιοχή αντίληψης και αυξάνεται η αξιοπιστία ολόκληρου του συστήματος σε περίπτωση που κάποιος αισθητήρας αποτύχει.

Γενικά η σύντηξη δεδομένων δεν είναι κάτι καινούργιο στην έρευνα. Έχουν γίνει αρκετά σε επίπεδο στρατιωτικών εφαρμογών, αλλά, εν γένει, είναι μια νέα προσέγγιση στο πεδίων των αυτοκινήτων. Αυτή τη στιγμή, σε επιστημονικό επίπεδο στα αυτοκίνητα, έχει υλοποιηθεί σύντηξη δεδομένων από πολλούς ετερογενείς αισθητήρες ή συσκευές που είναι τοποθετημένες πάνω στο αυτοκίνητο π.χ. ραντάρ (μικρής, μεσαίας και μεγάλης εμβέλειας), σαρωτές laser, κάμερες, GPS συσκευές, αδρανειακοί αισθητήρες, ψηφιακοί χάρτες.

Ένα λειτουργικό μοντέλο αρκετά όμοιο με το JDL (Joint Directors of Laboratories), το οποίο είναι το πιο διαδεδομένο στη σύντηξη δεδομένων, χρησιμοποιείται και για τη σύντηξη δεδομένων στα αυτοκίνητα. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο η επεξεργασία δεδομένων χωρίζεται στα ακόλουθα επίπεδα: σήματος, αντικειμένου, κατάστασης και εφαρμογής. Όλα αυτά τα επίπεδα επικοινωνούν και ανταλλάσσουν δεδομένα μέσω ενός διαχειριστή της μνήμης και του συστήματος.

Το JDL μοντέλο είναι απλώς ένα λειτουργικό μοντέλο το οποίο επιτρέπει διαφορετικές αρχιτεκτονικές για την υλοποίηση της σύντηξης δεδομένων. Οι χρησιμοποιούμενες αρχιτεκτονικές είναι η κεντρική, η κατανομημένη και η υβριδική. Καθεμία από αυτές τις αρχιτεκτονικές έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και θα παρουσιαστούν αναλυτικά στην παράγραφο 1.2.2.

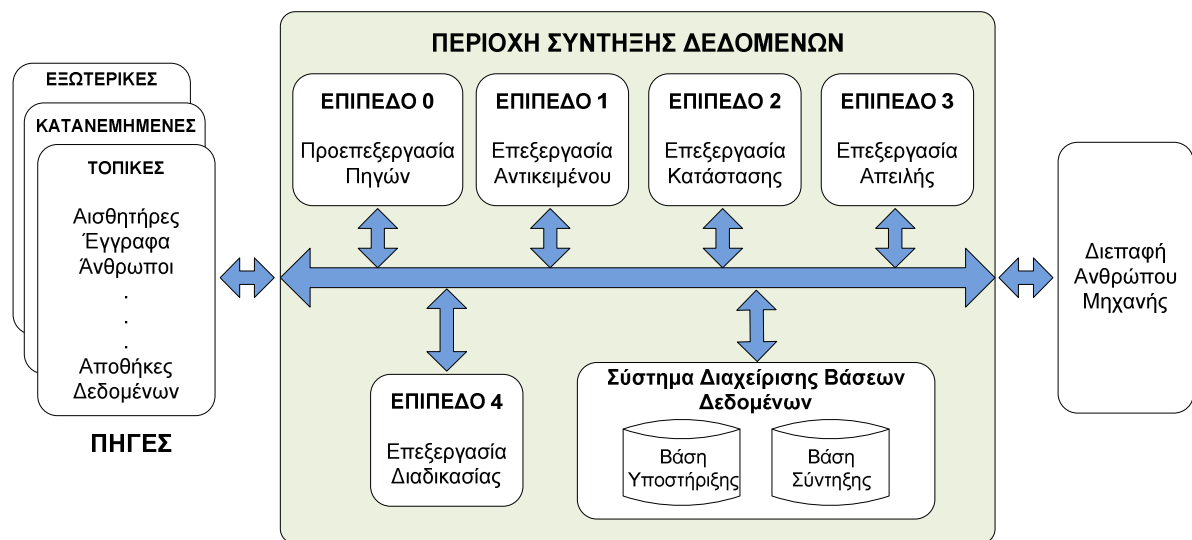
Στη διαδικασία σύντηξης δεδομένων κεντρικό ρόλο κατέχουν τα επίπεδα επεξεργασίας σε επίπεδο αντικειμένου και κατάστασης, τα οποία αναφέρονται στην εκτίμηση της κατάστασης των αντικειμένων και στις σχέσεις μεταξύ τους, αντίστοιχα. Η διάκριση μεταξύ αυτών των επιπέδων γίνεται πολλές φορές χρησιμοποιώντας τους όρους χαμηλό και υψηλό επίπεδο σύντηξης αντί για επεξεργασία αντικειμένου και κατάστασης.

Στον τομέα των αυτοκινήτων υπάρχουν πολλές εφαρμογές όπου η σύντηξη δεδομένων που προέρχονται από πολλαπλούς αισθητήρες είναι απαραίτητη. Μια πρόχειρη κατηγοριοποίηση αυτών των

εφαρμογών ανάλογα με την περιοχή κάλυψης των αισθητήρων είναι η ακόλουθη: διαμήκης υποστήριξη, πλευρική υποστήριξη και εφαρμογές ασφαλείας σε διασταυρώσεις. Περισσότερες λεπτομέρειες για τον διαχωρισμό αυτό καθώς και παραδείγματα θα δοθούν στη συνέχεια στην παράγραφο 1.2.5.

1.2.1 Το αναθεωρημένο JDL μοντέλο

Τα συστήματα σύντηξης δεδομένων από αισθητήρες μπορούμε να τα συναντήσουμε σε αριστέες εφαρμογές, από στρατιωτικές μέχρι ιδιωτικές. Παρά τη μεγάλη ποικιλία αυτών των εφαρμογών το λειτουργικό μοντέλο για τη σύντηξη δεδομένων είναι κοινό και αναπτύχθηκε το 1985 από την ομάδα “Data fusion group” του οργανισμού “Joint Directors of Laboratories (JDL)” των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής. Ο στόχος αυτής της ομάδας ήταν να αναπτύξει ένα μοντέλο το οποίο θα μπορούσε να βοηθήσει τους θεωρητικούς, τους μηχανικούς, τους διαχειριστές και τους χρήστες των τεχνικών σύντηξης δεδομένων να έχουν κοινή κατανόηση της διαδικασίας σύντηξης και των πολλαπλών επιπέδων της. Από τότε το μοντέλο συνεχώς αναθεωρείται και αναβαθμίζεται και αυτό που περιγράφεται στην Εικόνα 2 είναι από την αναθεώρηση του 1998 [1].



Εικόνα 2: Το JDL μοντέλο

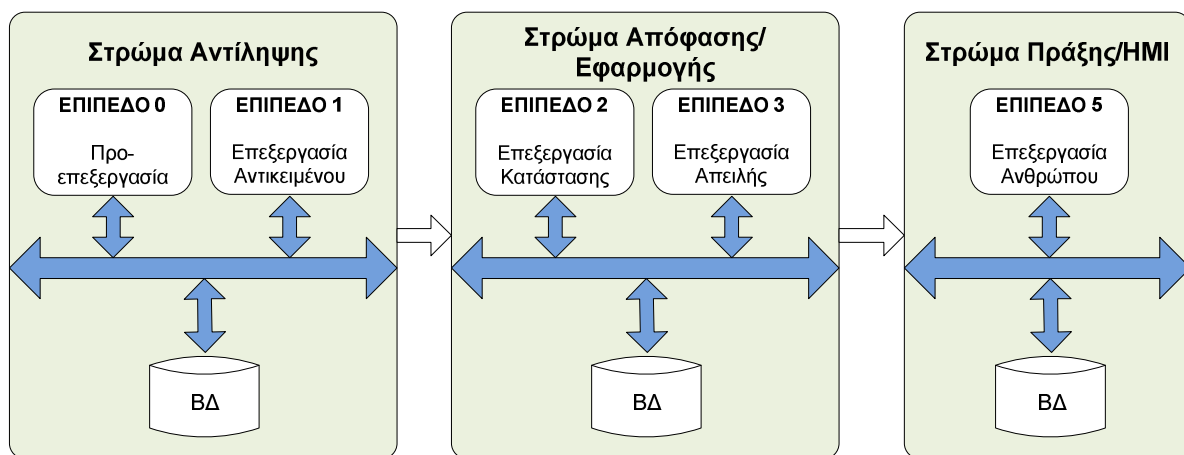
Τα επίπεδα σύντηξης με βάση το JDL μοντέλο είναι:

- *Επίπεδο 0*: Προ-επεξεργασία των μετρήσεων από τους αισθητήρες (επεξεργασία σε επίπεδο σήματος ή pixel).
- *Επίπεδο 1*: Εκτίμηση και πρόβλεψη των καταστάσεων της οντότητας με βάση την εξαγωγή συμπεράσματος από παρατηρήσεις.
- *Επίπεδο 2*: Εκτίμηση και πρόβλεψη των καταστάσεων της οντότητας με βάση τις συναγόμενες σχέσεις μεταξύ των οντοτήτων.

- *Επίπεδο 3:* Εκτίμηση και πρόβλεψη των επιδράσεων σε καταστάσεις από σχεδιασμένες ή εκτιμώμενες/προβλεπόμενες ενέργειες από τους συμμετέχοντες.
- *Επίπεδο 4:* Προσαρμοστική απόκτηση δεδομένων και επεξεργασία που σχετίζεται με τη διαχείριση πόρων και τη βελτίωση της επίδοσης του συστήματος σε πραγματικό χρόνο.

Το ερώτημα που γεννάται τώρα είναι πως αυτό το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί σε συστήματα ασφάλειας σε αυτοκίνητα που περιέχουν πολλαπλούς αισθητήρες. Το σχετικό αναθεωρημένο JDL μοντέλο, με βάση την εργασία που έγινε στο [2], απεικονίζεται στην Εικόνα 3.

Σύμφωνα με την κοινότητα δεδομένων σύντηξης που υπάρχει στον τομέα των αυτοκινήτων το επίπεδο 4 δεν ανήκει στον πυρήνα της διαδικασίας σύντηξης και γι' αυτό το λόγο έχει μείνει έξω από το μοντέλο στην Εικόνα 3. Ένα θέμα κλειδί που απασχολεί τις αυτοκινητοβιομηχανίες είναι το επίπεδο 5, το οποίο αφορά τη διεπαφή ανθρώπου-μηχανής, αλλά δεν θεωρείται τμήμα του τομέα σύντηξης δεδομένων (βλέπε Εικόνα 2). Ενώ ο σκοπός των πρώτων συστημάτων σύντηξης δεδομένων ήταν η αντικατάσταση της ικανότητας του ανθρώπου για εξαγωγή συμπερασμάτων και η δυνατότητα του συστήματος να αποφασίσει από μόνο του, πρόσφατα ο άνθρωπος έγινε όλο και πιο σημαντικός στη διαδικασία σύντηξης, ιδίως σε αυτοκινητιστικές εφαρμογές, και υπάρχουν σκέψεις για επέκταση του JDL μοντέλου ώστε να συμπεριλάβει και τον άνθρωπο στη διαδικασία.



Εικόνα 3: Το αναθεωρημένο JDL μοντέλο

1.2.2 Αρχιτεκτονικές σύντηξης δεδομένων

Από το αναθεωρημένο JDL μοντέλο που φαίνεται στην Εικόνα 3 δεν συνεπάγεται ακριβώς ο τρόπος με τον οποίο υλοποιείται η σύντηξη δεδομένων και πως οι πληροφορίες μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων ανταλλάσσονται. Εξαιτίας του γεγονότος αυτού μια ποικιλία από αρχιτεκτονικές μπορεί να προκύψουν από αυτό το λειτουργικό μοντέλο. Με βάση τον τρόπο που συνδυάζονται οι πληροφορίες, τρεις διαφορετικές

αρχιτεκτονικές μπορούν να υλοποιηθούν: κεντρική, καταναμημένη και υβριδική. Τα πλεονεκτήματα, εμμέσως και τα μειονεκτήματα, της κάθε αρχιτεκτονικής συνοψίζονται στον Πίνακα 1 [3].

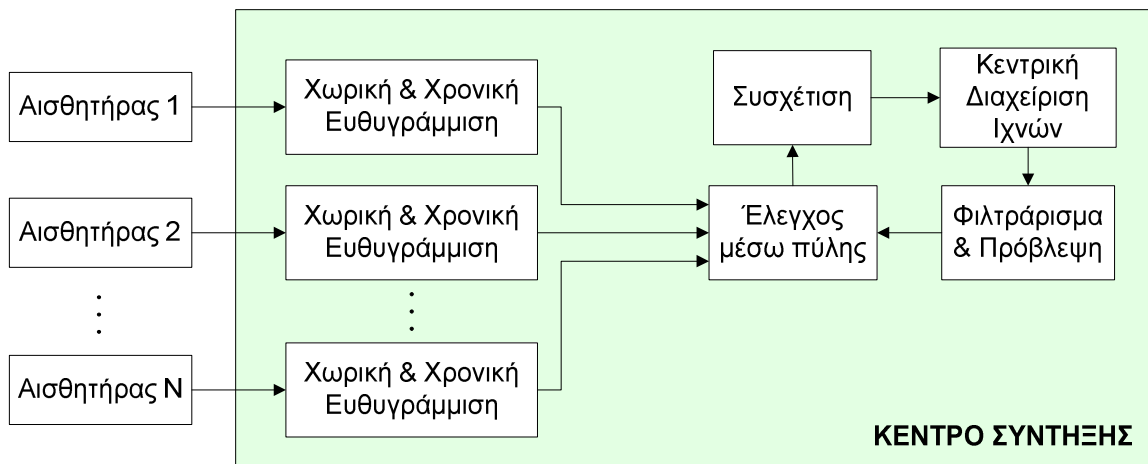
Κεντρική Αρχιτεκτονική	Καταναμημένη Αρχιτεκτονική
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Συσχέτιση δεδομένων και ιχνηλασία με ακρίβεια ▪ Βελτιστοποίηση της εκτιμώμενης θέσης και του ίχνους ενός αντικειμένου ▪ Μειωμένο βάρος, όγκος, ισχύς και παραγωγικό κόστος σε σχέση με την καταναμημένη αρχιτεκτονική (χρησιμοποίηση λιγότερων επεξεργαστών) ▪ Αυξημένη αξιοπιστία υλικού (HW) (απαιτούνται λιγότεροι επεξεργαστές στην αλυσίδα της σύντηξης δεδομένων) ▪ Η λογική και η υλοποίηση είναι άμεση ▪ Η χρήση του αλγορίθμου ιχνηλασίας πολλαπλών υποθέσεων (Multiple Hypothesis Tracking) είναι άμεση 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Η προ-επεξεργασία των δεδομένων μειώνει το φόρτο του κεντρικού επεξεργαστή (μέτρες απαιτήσεις για μεταφορά δεδομένων) ▪ Πιο αποδοτική χρησιμοποίηση των μεμονωμένων χαρακτηριστικών των αισθητήρων ▪ Βελτιστοποίηση της επεξεργασίας σήματος σε κάθε αισθητήρα ▪ Λιγότερο ευάλωτη σε αστοχία αισθητήρα ▪ Ευελιξία στον αριθμό και τον τύπο των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται, γεγονός που επιτρέπει προσθήκη, αφαίρεση ή αλλαγή αισθητήρων χωρίς σημαντικές αλλαγές στη δομή του αλγορίθμου σύντηξης ▪ Αποτελεσματική από άποψη κόστους μιας και επιτρέπει περαιτέρω σύντηξη σε υπάρχων σχηματισμό πολλαπλών αισθητήρων

Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα κεντρικής και καταναμημένης αρχιτεκτονικής

Κεντρική αρχιτεκτονική

Η κεντρική αρχιτεκτονική είναι θεωρητικά η πιο καλή και ιδανικά έχει την καλύτερη απόδοση όταν όλοι οι αισθητήρες είναι ευθυγραμμισμένοι με ακρίβεια, δηλαδή όταν οι αισθητήρες μετρούν πανομοιότυπες φυσικές ποσότητες. Σε αυτή την αρχιτεκτονική όλες οι ανεπεξέργαστες μετρήσεις από όλους τους αισθητήρες συλλέγονται σε ένα επίπεδο κεντρικής επεξεργασίας (βλέπε Εικόνα 4). Από τη μία πλευρά, αυτό είναι και το κυριότερο πλεονέκτημα της κεντρικής αρχιτεκτονικής, δηλαδή ότι όλα τα ανεπεξέργαστα δεδομένα είναι διαθέσιμα στον αλγόριθμο σύντηξης. Από την άλλη πλευρά, ο αλγόριθμος σύντηξης είναι πολύ πιο πολύπλοκος σε σύγκριση με αυτόν που χρησιμοποιείται στην περίπτωση της καταναμημένης αρχιτεκτονικής, μιας και πρέπει να αναλύσει και να επεξεργαστεί μη επεξεργασμένα δεδομένα σε υψηλότερο ρυθμό. Για παράδειγμα, ο αλγόριθμος ιχνηλασίας πολλαπλών υποθέσεων (Multiple Hypothesis Tracking - MHT), ο οποίος αναφέρεται συνοπτικά στο [3], μπορεί να υλοποιηθεί εύκολα στην περίπτωση της κεντρικής αρχιτεκτονικής καθώς όλα τα δεδομένα είναι διαθέσιμα στον κεντρικό επεξεργαστή.

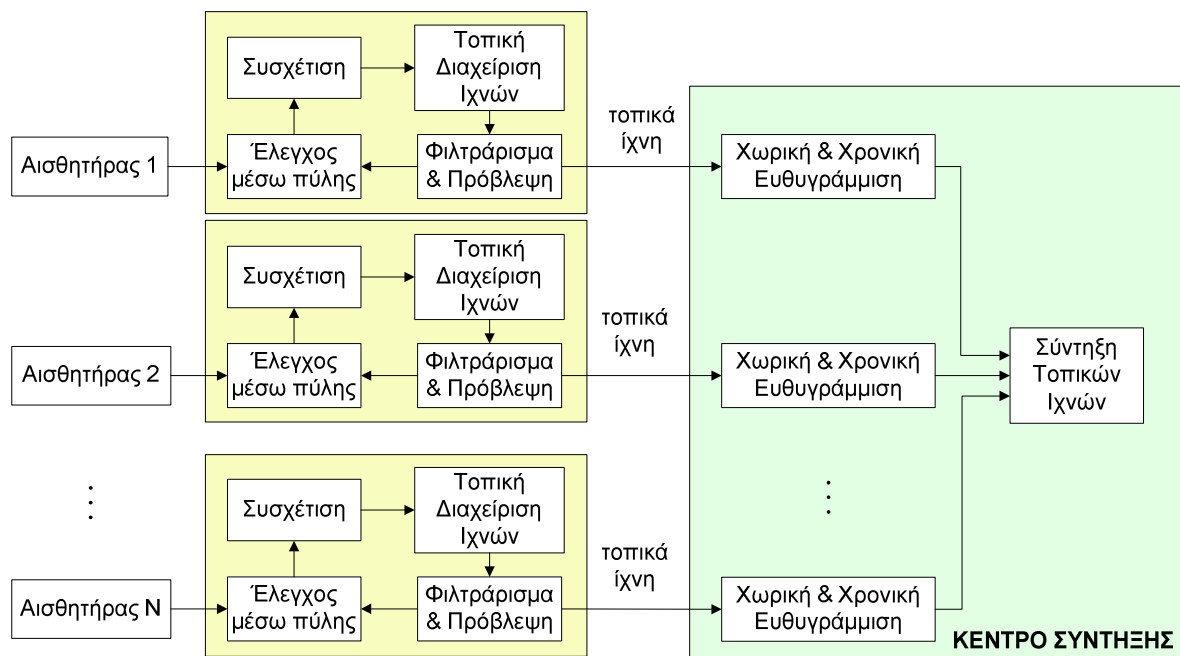
Η μέθοδος αυτή μπορεί να είναι ανεπαρκής ή μη ικανοποιητική σε κάποιες περιπτώσεις εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας δεδομένων που πρέπει να μεταφερθούν εγναίρως στον κεντρικό επεξεργαστή.



Εικόνα 4: Κεντρική αρχιτεκτονική

Κατανεμημένη αρχιτεκτονική

Η κατανεμημένη αρχιτεκτονική σύντηξης φαίνεται στην Εικόνα 5. Το κυριότερο πλεονέκτημα μιας κατανεμημένης αρχιτεκτονικής είναι η έλλειψη ευαισθησίας σχετικά με την σωστή ευθυγράμμιση των αισθητήρων. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική αυτή είναι κλιμακωτή στη δομή, χωρίς να περιορίζεται από κεντρικές υπολογιστικές συμφρορήσεις (bottlenecks), είναι ανθεκτική απέναντι σε αστοχία αισθητήρων και είναι και αρθρωτή (αποτελείται από υπομονάδες).



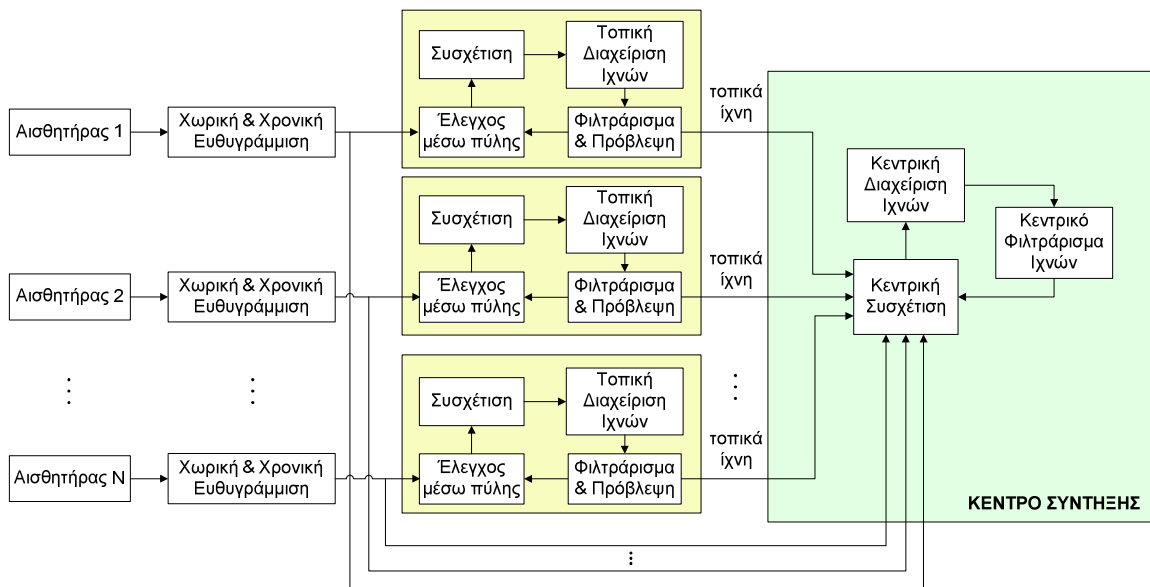
Εικόνα 5: Κατανεμημένη αρχιτεκτονική

Στην περίπτωση της κατανεμημένης σύντηξης, προ-επεξεργασμένα δεδομένα αποτελούν την είσοδο στον κεντρικό επεξεργαστή. Για κάθε αισθητήρα η επεξεργασία σε επίπεδο σήματος μπορεί να

πραγματοποιηθεί στον τομέα της συχνότητας ή στον τομέα του χρόνου ή σε επίπεδο pixel (επεξεργασία εικόνας) και η τελική είσοδος στον κεντρικό επεξεργαστή θα είναι η οντότητα με τις ιδιότητές της, συνοδευόμενη και με ένα συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης για περαιτέρω σύντηξη σε κεντρικό επίπεδο. Η «σιωπηλή» υπόθεση που γίνεται σε αυτό το σημείο είναι ότι οι αισθητήρες δρουν ανεξάρτητα, το οποίο δεν είναι αληθές σε όλες τις περιπτώσεις. Το κυριότερο μειονέκτημα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι πως υποφέρει από πλεονάζουσα πληροφορία.

Υβριδική αρχιτεκτονική

Στην περίπτωση της υβριδικής αρχιτεκτονικής, η κεντρική αρχιτεκτονική συμπληρώνεται από διαφορετικούς αλγορίθμους επεξεργασίας σήματος για κάθε ξεχωριστό αισθητήρα, ο οποίος μπορεί επιπλέον να αποτελεί είσοδο σε έναν εναλλακτικό αλγόριθμο σύντηξης δεδομένων σε επίπεδο αισθητήρα (βλέπε Εικόνα 6). Η υβριδική αρχιτεκτονική διατηρεί όλα τα πλεονεκτήματα της κεντρικής αρχιτεκτονικής, ενώ επιπλέον επιτρέπει την σύντηξη ιχνών που προέρχονται από μεμονωμένους αισθητήρες σε μια διαδικασία σύντηξης σε επίπεδο αισθητήρα. Το κυριότερο μειονέκτημα αυτής της υβριδικής προσέγγισης είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα της διαδικασίας και οι πιθανές υψηλές απαιτήσεις στο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων.



Εικόνα 6: Υβριδική αρχιτεκτονική

1.2.3 Επεξεργασία σε επίπεδο αντικειμένου

Η επεξεργασία αντικειμένου βρίσκεται στο πρώτο επίπεδο του JDL μοντέλου σύντηξης και αφορά την εκτίμηση των καταστάσεων διακριτών φυσικών αντικειμένων (αυτοκίνητα στην περίπτωσή μας). Η

ανάλυση σε αυτή την παράγραφο βασίζεται στην κατανεμημένη αρχιτεκτονική που περιγράφηκε νωρίτερα. Ο λόγος για την επιλογή της κατανεμημένης αρχιτεκτονικής είναι κυρίως εξαιτίας της αρθρωτής δομής της και της θεωρητικά ευκολότερης προσαρμογής της σε διαφορετικά αυτοκίνητα (ανεξάρτητα από τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται, με ελαφρά περαιτέρω επεξεργασία). Ως αποτέλεσμα, μπορεί να θεωρηθεί ως η πιο πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για μελλοντικές εφαρμογές στα αυτοκίνητα, αν ένα επίπεδο επεξεργασίας παίρνει μέρος σε κάθε αισθητήρα ή σύστημα αισθητήρα και δεν χρησιμοποιούνται ανεπεξέργαστα δεδομένα. Τα κύρια μέρη της επεξεργασίας σε επίπεδο αντικειμένου είναι τα ακόλουθα:

- Προ-επεξεργασία των μετρήσεων
- Ιχνηλασία σε επίπεδο αισθητήρα
- Χωρική & χρονική ευθυγράμμιση
- Συσχέτιση ίχνος-με-ίχνος
- Αλγόριθμος σύντηξης σε επίπεδο ίχνους
- Εκτίμηση της γεωμετρίας του δρόμου

Προ-επεξεργασία μετρήσεων

Μερικές φορές, σε πρακτικά προβλήματα, όταν οι αισθητήρες δίνουν μη επεξεργασμένα δεδομένα ένα πρώτο βήμα προ-επεξεργασίας είναι απαραίτητο. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες ραντάρ μακρινής εμβέλειας, που χρησιμοποιούνται στις αυτοκινητιστικές εφαρμογές, παρέχουν αντικείμενα σαν δεδομένα εξόδου, τα οποία δεν χρειάζονται περαιτέρω προ-επεξεργασία. Αντίθετα, οι σαρωτές λέιζερ παρέχουν πολύγωνα τα οποία πρέπει να κατηγοριοποιηθούν σε αυτοκίνητα και όρια δρόμου με την υλοποίηση της κατάλληλης προ-επεξεργασίας.

Ιχνηλασία σε επίπεδο αισθητήρα

Το κομμάτι αυτό αντιστοιχεί στα πρώτα ορθογώνια τμήματα που φαίνονται στην Εικόνα 5, που αφορά την κατανεμημένη αρχιτεκτονική, και παίρνουν σαν είσοδο τις μετρήσεις από τους αισθητήρες. Σε αυτά τα τμήματα λαμβάνουν χώρα ο σχηματισμός της πύλης, η συσχέτιση των δεδομένων, το φιλτράρισμα και η διαχείριση των τοπικών ίχνων. Πρώτα από όλα για τον αλγόριθμο ιχνηλασίας ένα μοντέλο κίνησης πρέπει να επιλεγεί για την ενημέρωση του φίλτρου Kalman (ο πίνακας μετάβασης του φίλτρου Kalman) [3]. Τα μοντέλα κίνησης που χρησιμοποιούνται ευρέως στο πεδίο των αυτοκινήτων είναι το μοντέλο σταθερής επιτάχυνσης (constant acceleration - CA) και το μοντέλο σταθερής επιτάχυνσης και σταθερής γωνιακής ταχύτητας (constant turn rate and acceleration - CTRA) τα οποία περιγράφονται με λεπτομέρεια στα [3,4].

Υστερα από την επιλογή του μοντέλου κίνησης ακολουθεί το πρόβλημα της συσχέτισης της μέτρησης-με-ίχνος, το οποίο είναι το πρόβλημα εύρεσης της καλύτερης συσχέτισης μεταξύ ίχνων και μετρήσεων. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι συσχέτισης οι οποίες αναφέρονται αναλυτικά στο [3]. Οι πιο γνωστές είναι ο καθολικός κοντινότερος γείτονας (Global Nearest Neighbor - GNN) και η από κοινού

πιθανοτική συσχέτιση δεδομένων (Joint Probabilistic Data Association - JPDA). Η πρώτη είναι ένα-προς-ένα ανάθεση μέτρησης σε ίχνος, ενώ η δεύτερη χρησιμοποιεί πάνω από μια μέτρηση για ενημέρωση ενός ίχνους καθώς και περισσότερα από ένα ίχνη μπορούν να ενημερωθούν από την ίδια μέτρηση. Η επιλογή της μίας ή της άλλης μεθόδου εξαρτάται από την ποιότητα και τη φύση των μετρήσεων των αισθητήρων. Για παράδειγμα, για έναν αλγόριθμο ιχνηλασίας που πραγματοποιείται για έναν αισθητήρα ραντάρ μεγάλης εμβέλειας, η GNN προσέγγιση είναι επαρκής [3,5].

Στη συνέχεια, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του προβλήματος συσχέτισης το τμήμα που αφορά τη διαχείριση των ίχνων πρέπει να αποφασίσει για την αρχικοποίηση των νέων ίχνων και την επιβεβαίωση ή διαγραφή των ήδη υπαρχόντων ίχνων. Η διαδικασία απόφασης βασίζεται σε απλούς κανόνες διαδοχικών «επιτυχιών» και «αποτυχιών», όπου σαν επιτυχία ορίζεται όταν υπάρχει επιτυχής συσχέτιση μεταξύ τουλάχιστον μιας μέτρησης και ενός ίχνους και σαν αποτυχία όταν ένα ίχνος παραμένει χωρίς να του ανατεθεί μέτρηση στον τρέχον κύκλο της διαδικασίας [6].

Το τελικό βήμα στην ιχνηλασία σε επίπεδο αισθητήρα είναι οι συναρτήσεις φιλτραρίσματος και πρόβλεψης, όπου τα νέα αβέβαια ίχνη (στα οποία δεν έχουν ανατεθεί μετρήσεις) και τα προηγούμενα υπάρχοντα επιβεβαιωμένα ίχνη φιλτράρονται και αποτελούν είσοδο στην διαδικασία συσχέτισης ίχνους-με-ίχνος. Επίσης, σύμφωνα με το μοντέλο κίνησης που έχει επιλεγεί προβλέπεται η μελλοντική θέση των ενημερωμένων ίχνων (καινούργια και υπάρχοντα) και υπολογίζεται η πύλη για περαιτέρω επεξεργασία του ίχνους. Ο σκοπός αυτής της πύλης είναι να μειώσει το υπολογιστικό φορτίο από τον έλεγχο όλων των μετρήσεων με όλα τα ίχνη και να ερευνήσει τη συσχέτιση των ίχνων με τις μετρήσεις που εμπίπτουν μέσα στις πύλες τους.

Χωρική και χρονική ευθυγράμμιση

Το επόμενο βήμα είναι η χωρική και χρονική ευθυγράμμιση όλων των ίχνων που προέρχονται από τους διαφορετικούς αισθητήρες. Για την περαιτέρω συσχέτιση και σύντηξη των ίχνων αυτών απαιτείται ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων καθώς και κοινός χρόνος αναφοράς. Στις περισσότερες περιπτώσεις το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται έχει την αρχή του στο γεωμετρικό κέντρο του αυτοκινήτου και ο διαμήκης άξονας είναι ο άξονας x. Σαν χρονική αναφορά χρησιμοποιείται ο χρόνος του διαύλου CAN⁴ (Controller Area Network). Όλα τα ίχνη τα οποία προέρχονται από τους διαφορετικούς αισθητήρες τροφοδοτούνται στον δίαυλο CAN και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ο συγχρονισμός των ίχνων.

Συσχέτιση ίχνος-με-ίχνος

Εφόσον τα ίχνη που προέρχονται από την ιχνηλασία επιπέδου αισθητήρα ευθυγραμμιστούν στο χώρο και στο χρόνο, εκτελείται η συσχέτιση ίχνους με ίχνος. Ο σκοπός αυτής της συσχέτισης είναι να

⁴ Το CAN είναι ένα πρωτόκολλο δικτύου, σχεδιασμένο ειδικά για εφαρμογές στα αυτοκίνητα, το οποίο επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ της ηλεκτρονικής μονάδας ελέγχου (ή των ηλεκτρονικών μονάδων ελέγχου) του κάθε αυτοκινήτου με άλλες συσκευές και αισθητήρες που είναι συνδεδεμένοι με αυτό.

αποφασίσει ποια ίχνη, τα οποία προέρχονται από διαφορετικούς αισθητήρες, αναφέρονται στο ίδιο αντικείμενο. Αυτό είναι χρήσιμο στις περιπτώσεις που έχουμε πολλαπλούς αισθητήρες με κοινές ή συμπληρωματικές περιοχές παρακολούθησης. Σε περίπτωση που τρεις ή περισσότεροι αισθητήρες παρατηρούν το ίδιο αντικείμενο τότε η προσέγγιση της πολυδιάστατης ανάθεσης χρησιμοποιείται. Για τέτοιου είδους προβλήματα μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας η μέθοδος της χαλάρωσης του Lagrange [7].

Αλγόριθμος σύντηξης σε επίπεδο ίχνους

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για ενημέρωση δύο ή περισσότερων ιχνών (με τη χρήση διανυσμάτων κατάστασης και πινάκων συνδιακύμανσης) με τη σύντηξη ίχνους με ίχνος. Μερικές από αυτές τις μεθόδους περιγράφονται περιληπτικά στις γραμμές που ακολουθούν.

Όσον αφορά την επιλογή μεθόδου σύντηξης για ενημέρωση δύο ιχνών είναι εφαρμόσιμες αρκετές μέθοδοι. Αρχικά μπορούμε να αναφέρουμε την απλή σύντηξη [8] η οποία υπονοεί πως τα ίχνη είναι ασυσχέτιστα και επομένως είναι μη βέλτιστη μέθοδος. Η σύντηξη των συνδιακυμάνσεων με βάρη (weighted covariance) [3,9] λαμβάνει υπόψη της τη συσχέτιση μεταξύ των ιχνηλατών (κοινός θόρυβος διαδικασίας) παράγοντας έτσι τον πίνακα ετεροσυνδιακύμανσης (cross covariance) από τους υπάρχοντες πίνακες συνδιακύμανσης.

Η μέθοδος σύντηξης που τελικά επιλέγεται όταν είναι διαθέσιμα αξιόπιστα ίχνη είναι η μέθοδος της τομής συνδιακύμανσης (covariance intersection) [10]. Η μέθοδος αυτή της τομής συνδιακύμανσης αντιμετωπίζει το πρόβλημα της μη έγκυρης εισαγωγής πλεονάζουσας πληροφορίας. Η μέθοδος της ένωσης συνδιακύμανσης (covariance union) [11] λύνει το πρόβλημα της αποσύνθεσης των δεδομένων από ψευδείς εκτιμήσεις. Επίσης η μέθοδος αυτή εγγυάται συνέπεια εφόσον το σύστημα και οι εκτιμήσεις μέτρησης είναι και αυτές συνεπείς, αλλά είναι υπολογιστικά απαιτητική. Η μέθοδος της τομής συνδιακύμανσης είναι μια συντηρητική μέθοδος αλλά είναι ανώτερη σε σχέση με την μέθοδο συνδιακύμανσης με βάρη.

Ωστόσο σε πολλές πρακτικές περιπτώσεις η συνδιακύμανση αναξιόπιστων ιχνών μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβείς εκτιμήσεις και συνεπώς σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα σταθερό προκαθορισμένο βάρος. Τελικά, σύμφωνα με το οδικό περιβάλλον, το υπολογιστικό φορτίο, το θόρυβο διαδικασίας, τη συσχέτιση των μετρήσεων των αισθητήρων και την υπόθεση ανεξαρτησίας η κατάλληλη μέθοδος σύντηξης μπορεί να επιλεγεί.

Εκτίμηση της γεωμετρίας του δρόμου

Ο ρόλος της επεξεργασίας σε επίπεδο αντικειμένου δεν είναι μόνο η εκτίμηση της κατάστασης του κάθε αυτοκινήτου, αλλά και η εκτίμηση της κατάστασης των άλλων αντικειμένων του οδικού περιβάλλοντος, όπως είναι για παράδειγμα τα όρια του δρόμου. Παράλληλα με την ιχνηλασία σε επίπεδο αισθητήρα τρέχει (προαιρετικά) και ένας αλγόριθμος εκτίμησης της γεωμετρίας του δρόμου. Το μαθηματικό μοντέλο για την αναπαράσταση της γεωμετρίας του δρόμου μπορεί να είναι το κλωθειδές μοντέλο (clothoid model) [12] ή το μοντέλο B-Splines [13]. Ο βασικός αισθητήρας που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή της γεωμετρίας

του δρόμου είναι μία κάμερα. Αυτή η κάμερα, μετά από την επεξεργασία εικόνας, παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις λωρίδες, το είδος των λωρίδων, την καμπυλότητα του δρόμου κλπ. και χρησιμοποιώντας το κλωθοειδές μοντέλο ή το B-Splines μια πρώτη εκτίμηση της γεωμετρίας του δρόμου μπορεί να εξαχθεί.

Επιπλέον, η γεωμετρία του δρόμου μπορεί να εκτιμηθεί με βάση πληροφορίες που προέρχονται από μια βάση δεδομένων ψηφιακών χαρτών. Η τρέχουσα θέση του αυτοκινήτου στο χάρτη μπορεί να εξαχθεί με βάση έναν GPS ή διαφορικό GPS (DGPS) δέκτη και προηγμένες τεχνικές ταιριάσματος σε χάρτη (map matching techniques). Ένας τρόπος για εξαγωγή της γεωμετρίας του δρόμου χρησιμοποιώντας ψηφιακούς χάρτες περιγράφεται με λεπτομέρεια στο [14].

Η σύντηξη αυτών των εκτιμήσεων για την απόκτηση της τελικά εκτιμώμενης γεωμετρίας του δρόμου επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός ασαφούς συστήματος (fuzzy system) [15] ή ενός συστήματος λογικής Dempster-Shafer [16,17]. Επιπρόσθετα, άλλοι ενεργοί αισθητήρες, π.χ. ραντάρ ή σαρωτές λέιζερ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν είσοδος στη διαδικασία σύντηξης για να ενισχύσουν τη σταθερότητα του συστήματος [14,18]. Η διαδικασία σύντηξης, σε αυτή την περίπτωση, βασίζεται στην υπόθεση ότι τα δεδομένα από την κάμερα και από το σαρωτή λέιζερ είναι πιο αξιόπιστα κοντά στο αυτοκίνητο, ενώ αρκετά μακριά μπροστά από το αυτοκίνητο τα δεδομένα από τους χάρτες είναι πιο ακριβή.

1.2.4 Επεξεργασία σε επίπεδο κατάστασης

Η επεξεργασία κατάστασης ανήκει στο δεύτερο επίπεδο του JDL μοντέλου και αναφέρεται στις σχέσεις μεταξύ διάφορων αντικειμένων στο οδικό περιβάλλον. Αρκετά συχνά χρησιμοποιείται εναλλακτικά ο όρος «σύντηξη υψηλού επιπέδου». Μέσα από την επεξεργασία σε επίπεδο κατάστασης γίνεται προσπάθεια να γίνει κατανοητό το νόημα της τρέχουσας κατάστασης που εκτυλίσσεται γύρω από το αυτοκίνητο. Μερικές από τις ερωτήσεις με τις οποίες ασχολείται το συγκεκριμένο επίπεδο είναι: «Εμπλέκεται αυτή η ομάδα των αργά κινούμενων αυτοκινήτων σε μποτιλιάρισμα;», «Οι τροχιές των δύο αυτοκινήτων που πλησιάζουν διασταυρώνονται; Υπάρχει κίνδυνος σύγκρουσης;» κλπ.

Οι τρεις πιο γνωστές θεωρίες που χρησιμοποιούνται στη σύντηξη δεδομένων υψηλού επιπέδου, ανάλογα με το πρόβλημα, είναι οι ακόλουθες: ασαφή συστήματα (fuzzy systems) [15,19], θεωρία πιθανοτήτων Bayes [20,21] και θεωρία Dempster-Shafer [16,17]. Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζεται μια σύνοψη των κυρίως μερών της επεξεργασίας σε επίπεδο κατάστασης αλλά η επιλογή της καταλληλότερης θεωρίας δεν υποδεικνύεται ρητά, μιας και εξαρτάται από το είδος των διαθέσιμων πληροφοριών και του τύπου της αβεβαιότητας αυτών.

Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας σε επίπεδο κατάστασης εμπλουτίζει το μοντέλο του περιβάλλοντος συμπεριλαμβάνοντας επιπλέον χαρακτηριστικά του υποκείμενου αυτοκινήτου⁵ και των άλλων αντικειμένων (π.χ. μελλοντικές τροχιές, προβλεπόμενοι ελιγμοί).

⁵ Ο όρος “υποκείμενο αυτοκίνητο” ή “υποκείμενο όχημα” χρησιμοποιείται σε ολόκληρη τη διατριβή σαν το αυτοκίνητο αναφοράς το οποίο φέρει τεχνολογίες έξυπνων οχημάτων.

Η επεξεργασία σε επίπεδο κατάστασης αποτελεί τη βάση για την αποτίμηση του κινδύνου της παρούσας και των μελλοντικών καταστάσεων που έχουν προβλεφθεί, δεδομένου ότι όλοι οι εμπλεκόμενοι θα δράσουν με προβλέψιμο τρόπο. Τέλος, η επεξεργασία σε επίπεδο κατάστασης μπορεί να είναι αβέβαιη εξαιτίας έλλειψης γνώσης και της αβεβαιότητας των πηγών πληροφορίας [22,23].

Τα κυριότερα μέρη της επεξεργασίας σε επίπεδο κατάστασης που αναλύονται στη συνέχεια σε αυτό το κεφάλαιο είναι τα παρακάτω:

- Πρόβλεψη τροχιάς
- Ανίχνευση ελιγμού
- Πρόθεση οδηγού
- Ανάθεση λωρίδας σε αντικείμενο
- Υψηλού επιπέδου συμβάντα

Πρόβλεψη τροχιάς

Η πρόβλεψη της μελλοντικής τροχιάς αποτελεί βασική συνιστώσα της επεξεργασίας σε επίπεδο κατάστασης και μπορεί να διακριθεί σε τρία μέρη. Το πρώτο μέρος είναι ο υπολογισμός της μελλοντικής πορείας του αυτοκινήτου με βάση την τρέχουσα δυναμική κατάστασή του και την υιοθέτηση ενός συγκεκριμένου μοντέλου κίνησης. Το μοντέλο αυτό θα μπορούσε να είναι το μοντέλο σταθερής ταχύτητας (Constant Velocity - CV), σταθερής επιτάχυνσης (Constant Acceleration - CA), σταθερής γωνιακής ταχύτητας (Constant Turn Rate - CTR), σταθερής γωνιακής ταχύτητας και επιτάχυνσης (Constant Turn Rate and Acceleration - CTRA) ή το μοντέλο του δικύκλου (Bicycle Model - BM) [24,25]. Επίσης θα μπορούσε να είναι ένας συνδυασμός δύο ή τριών από τα παραπάνω μοντέλα κίνησης, με χρήση ενός φίλτρου αλληλεπιδρώντων πολλαπλών μοντέλων (Interacting Multiple Model - IMM), ή ένα δυναμικά προσαρμοζόμενο μοντέλο που βασίζεται σε κανόνες. Επίσης ένα φίλτρο Kalman είναι χρήσιμο για την εξομάλυνση της δυναμικής κατάστασης του αυτοκινήτου (π.χ. ταχύτητα, γωνιακή ταχύτητα) και τη μείωση του θορύβου των μετρήσεων. Το δεύτερο μέρος αποτελείται από την εξαγωγή της μελλοντική πορεία με βάση την εκτίμηση των ορίων του δρόμου και με την παραδοχή ότι ο οδηγός θα ακολουθήσει τη γεωμετρία του δρόμου χωρίς να εκτελέσει κάποιον ελιγμό. Επιπλέον, σε αυτό το μέρος η επιλογή κάποιου μοντέλου κίνησης είναι απαραίτητη. Στις περισσότερες των περιπτώσεων στην πράξη ένα CV μοντέλο αρκεί. Το τρίτο και πιο εξελιγμένο μέρος είναι ο συνδυασμός των δύο πρώτων μερών. Η σύντηξη αυτών των τροχιών μπορεί να γίνει με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Ο απλούστερος τρόπος είναι η χρησιμοποίηση μιας εκτίμησης σταθμισμένου μέσου (weighted average). Για τον υπολογισμό της βραχυπρόθεσμης μελλοντικής τροχιάς η δυναμική κατάσταση του αυτοκινήτου είναι πιο σημαντική, ενώ για τη μακροπρόθεσμη τροχιά η εκτίμηση της γεωμετρίας του δρόμου έχει σημαντική επίδραση. Ο ενδιαφερόμενος μπορεί να βρει περισσότερες πληροφορίες για το θέμα αυτό στο [18].

Ανίχνευση ελιγμού

Ο σκοπός αυτού του αλγορίθμου είναι να προσδιοριστούν οι ελιγμοί που εκτελεί ο οδηγός. Ο υπολογισμός αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί με ένα Dempster-Shafer σύστημα συλλογιστικής. Στην αρχή θα πρέπει να σχηματιστεί το σύνολο των ελιγμών που μπορεί να ανιχνεύσει το σύστημα. Ένα παράδειγμα συνόλου είναι το εξής:

$$\Omega = \{\text{ελεύθερη κίνηση, αλλαγή λωρίδας, προσπέραση}\}$$

Σύμφωνα με το παραπάνω σύνολο και τις πηγές πληροφορίας το Dempster-Shafer σύστημα συλλογιστικής μπορεί να εκτιμήσει τον πραγματικό ελιγμό που γίνεται από το αυτοκίνητο. Οι πηγές πληροφορίας θα μπορούσαν να είναι: ο εκτιμώμενος χρόνος που το αυτοκίνητο χρειάζεται για να διασχίσει τη λωρίδα, η ελάχιστη απόσταση του αυτοκινήτου από τη λωρίδα, ο χρόνος που χρειάζεται ώστε η ελάχιστη αυτή απόσταση να μπορεί να επιτευχθεί, η καμπυλότητα του δρόμου, η καμπυλότητα της τροχιάς του αυτοκινήτου και η απόσταση από το προπορευόμενο αυτοκίνητο. Για κάθε μία από αυτές τις πηγές μια συνάρτηση βασικής πιθανότητας ανάθεσης (basic probability assignment function) θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των μαζών απόδειξης (evidence masses). Έπειτα οι συνδυασμένες μάζες απόδειξης θα πρέπει να υπολογίζονται και οι τιμές εμπιστοσύνης (belief) και αληθοφάνειας (plausibility) θα εξαχθούν, με σκοπό να αξιολογήσουν τον τελικό βαθμό εμπιστοσύνης.

Ένα παράδειγμα για το πώς ο αλγόριθμος υπολογίζει έναν εκτελούμενο ελιγμό είναι το ακόλουθο: Ας υποθέσουμε ότι το υποκείμενο αυτοκίνητο προσπερνά ένα άλλο αυτοκίνητο. Ο χρόνος για να διασχίσει τη λωρίδα θα πρέπει να έχει πολύ μικρές τιμές και το υποκείμενο αυτοκίνητο θα πρέπει να ακολουθεί ένα άλλο αυτοκίνητο σε σχετικά μικρή απόσταση. Αν αυτές είναι οι πληροφορίες που εισάγονται στο σύστημα, τότε ο αλγόριθμος θα πρέπει να εντοπίσει έναν ελιγμό προσπέρασης με μεγάλη εμπιστοσύνη.

Πρόθεση οδηγού

Μια άλλη σημαντική λειτουργία στον τομέα της επεξεργασίας σε επίπεδο κατάστασης είναι να ελεγχθεί εάν ο ελιγμός που εκτέλεσε ο οδηγός ήταν σκόπιμος ή όχι. Αυτό μπορεί να έχει μεγάλη σημασία ειδικά για τη διεπαφή ανθρώπου-μηχανής (Human Machine Interface - HMI). Για παράδειγμα, αν το αποτέλεσμα του αλγορίθμου που αφορά την πρόθεση του οδηγού είναι ότι ο τρέχων εκτελούμενος ελιγμός δεν ήταν σκόπιμος, τότε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα μιας επερχόμενης δυσάρεστης κατάστασης, επομένως το σύστημα HMI θα πρέπει να παρέμβει και να ενημερώσει τον οδηγό πριν είναι πολύ αργά. Ένα Dempster-Shafer ή ασαφές ή βασισμένο σε κανόνες σύστημα εξαγωγής συμπεράσματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναγνωρίσει την πρόθεση του οδηγού. Τις πηγές εισόδου σε αυτό το σύστημα αποτελούν η έξοδος του αλγορίθμου ανίχνευσης ελιγμού, ο τύπος του δρόμου (αγροτικός δρόμος, εθνική οδός, περιοχή που γίνονται έργα κλπ.), η καμπυλότητα του δρόμου, και άλλα δεδομένα του αυτοκινήτου, όπως είναι η κατάσταση του φλας (ON/OFF), η ταχύτητα κλπ.

Η διατύπωση των κανόνων σε ένα βασισμένο σε κανόνες σύστημα ή οι συναρτήσεις συμμετοχής σε ένα ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπεράσματος ή οι συναρτήσεις βασικής πιθανότητας ανάθεσης σε ένα Dempster-Shafer σύστημα βασίζονται σε απλές οδηγίες. Για παράδειγμα, η πιθανότητα για σκόπιμη αλλαγή λωρίδας σε απότομα καμπύλα τμήματα του δρόμου είναι χαμηλότερη απ' ό,τι στην περίπτωση των ευθύγραμμων τμημάτων του οδικού δικτύου. Όταν η καμπυλότητα υπερβαίνει ένα όριο, τότε είναι πολύ απίθανο ο οδηγός να αλλάξει λωρίδα.

Ανάθεση λωρίδας σε αντικείμενο

Αυτό το μέρος της επεξεργασίας σε επίπεδο κατάστασης είναι υπεύθυνο για την ανάθεση ενός δείκτη λωρίδας σε κάθε αντικείμενο του οδικού περιβάλλοντος έχοντας πάντα ως λωρίδα αναφοράς αυτή στην οποία βρίσκεται το υποκείμενο αυτοκίνητο (η λωρίδα αυτή έχει πάντα δείκτη 0). Στην ουσία με αυτόν τον τρόπο φαίνεται η σχέση μεταξύ των αντικειμένων που εντοπίστηκαν στο δρόμο, τις λωρίδες του δρόμου και το υποκείμενο αυτοκίνητο. Ένα Dempster-Shafer σύστημα συλλογιστικής εφαρμόζεται επίσης στην περίπτωση αυτή.

Οι πηγές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του δείκτη λωρίδας που αποδίδεται σε κάθε αντικείμενο είναι οι ακόλουθες:

- Η μετατόπιση της θέσης του κάθε αυτοκινήτου από εκείνη του υποκείμενου αυτοκινήτου αξιοποιώντας τη μελλοντική τροχιά που υπολογίστηκε προηγουμένως χρησιμοποιώντας διαφορετικά μοντέλα κίνησης (CA, CTR & CTRA).
- Η απόσταση του αντικείμενου που ανιχνεύτηκε από το υποκείμενο αυτοκίνητο.

Η μετατόπιση υπολογίζεται με βάση την μελλοντική τροχιά του υποκείμενου αυτοκινήτου και τις συντεταγμένες του αντικείμενου που ανιχνεύτηκε.

Οι συναρτήσεις βασικής πιθανότητας ανάθεσης σχηματίζονται με βάση τους εξής κανόνες:

- Όσο πιο κοντά στα όρια των λωρίδων βρίσκεται το αντικείμενο που έχει ανιχνευτεί, τόσο πιο χαμηλή είναι η μάζα απόδειξης που αποδίδεται στην αντίστοιχη πρόταση.
- Όσο πιο μακριά είναι το αντικείμενο που έχει ανιχνευτεί, τόσο πιο χαμηλή είναι η μάζα απόδειξης που ανατίθεται στην αντίστοιχη πηγή πληροφορίας.

Υψηλού επιπέδου συμβάντα

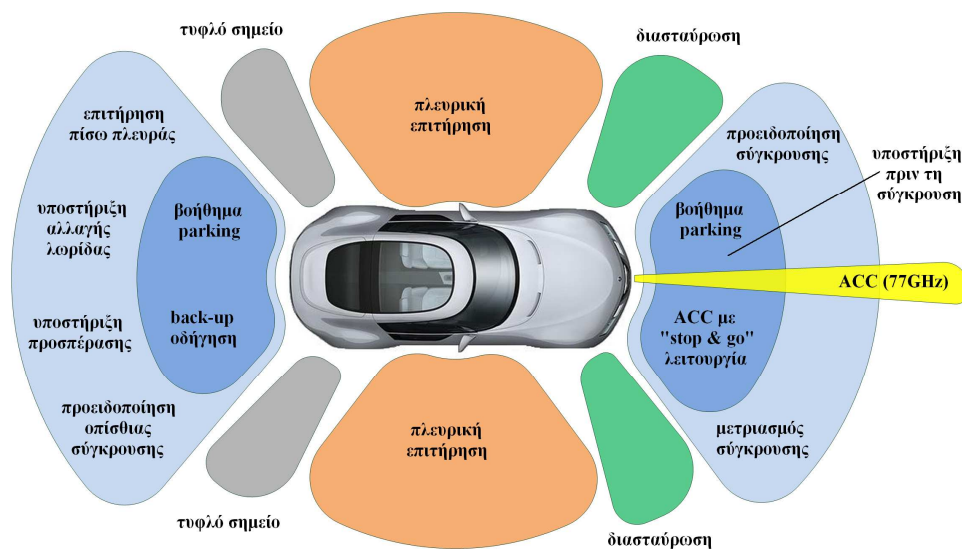
Δεδομένου ότι η επεξεργασία σε επίπεδο κατάστασης ονομάζεται επίσης υψηλού επιπέδου σύντηξη, υψηλού επιπέδου συμβάντα όπως η εκτίμηση των καιρικών συνθηκών και της κυκλοφορίας, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη σε αυτό το επίπεδο σύντηξης. Τόσο η εκτίμηση της πυκνότητας της κυκλοφορίας όσο και των καιρικών συνθηκών θα μπορούσε να βασιστεί σε μια προσέγγιση δικτύων Bayes (Bayesian Networks) [26,27].

Όσον αφορά την κυκλοφορία, θα μπορούσε να κατηγοριοποιηθεί σε ελαφρά, μέτρια ή πυκνή κυκλοφορία. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας της κυκλοφορίας απαιτούνται τα αντικείμενα από την επεξεργασία σε επίπεδο αντικειμένου καθώς και τα χαρακτηριστικά του δρόμου, όπως ο αριθμός των λωρίδων, η απόσταση από το δρόμο, η απόσταση από τη λωρίδα, το πλάτος του δρόμου, το πλάτος των λωρίδων και η κατεύθυνση, η καμπυλότητα και ο ρυθμός καμπυλότητας του αντίστοιχου τμήματος.

Η εκτίμηση των καιρικών συνθηκών (ομίχλη, βροχή, παγετός) είναι πολύ πιο περίπλοκη διαδικασία, γιατί γι' αυτό το είδος των υπολογισμών είναι απαραίτητη η είσοδος από ειδικούς αισθητήρες.

1.2.5 Εφαρμογές και παραδείγματα

Στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, υπάρχουν αρκετές εφαρμογές στις οποίες η σύντηξη δεδομένων από διάφορους αισθητήρες είναι απαραίτητη. Για πλήρη κάλυψη της περιοχής γύρω από το αυτοκίνητο και για ταυτόχρονη υποστήριξη πολλών διαφορετικών εφαρμογών, η σύντηξη δεδομένων γίνεται μια περίπλοκη διαδικασία. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται είναι ετερογενείς και διαφέρουν σε ποιότητα. Μερικοί αισθητήρες είναι κακής ποιότητας, ενώ άλλοι, όπως τα ραντάρ μεγάλης εμβέλειας είναι υψηλής ποιότητας. Για τα ραντάρ αυτά είναι απαραίτητη η υποστήριξη από άλλους αισθητήρες με ευρύτερη περιοχή κάλυψης λόγω της περιορισμένης περιοχής κάλυψής τους. Ο συγχρονισμός όλων αυτών των αισθητήρων, η επεξεργαστική ισχύς που απαιτείται (πολλοί ενσωματωμένοι υπολογιστές), ο χώρος που χρειάζεται για την εγκατάστασή τους στο αυτοκίνητο καθώς και το κόστος αποτελούν περιορισμούς για την ταχεία ενσωμάτωση των συστημάτων αυτών στην αγορά. Παρόλα τα παραπάνω στοιχεία, η κύρια πρόκληση σε όλες αυτές τις εφαρμογές, ώστε να οδηγήσουν στο μέλλον τα συστήματα ενεργητικής ασφάλειας στην επιτυχία, είναι ένα ισχυρό και αξιόπιστο σύστημα σύντηξης δεδομένων.



Εικόνα 7: Περιοχές κάλυψης για τις διάφορες εφαρμογές ασφαλείας

Στην Εικόνα 7 φαίνονται διαφορετικές εφαρμογές ασφάλειας των αυτοκινήτων και οι περιοχές κάλυψής τους. Είναι προφανές ότι υπάρχει μια σημαντική ποικιλία εφαρμογών στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, όπως είναι ο προσαρμοστικός έλεγχος πλοήγησης (Adaptive Cruise Control - ACC), εμπρόσθιος/οπίσθιος μετριασμός συγκρούσεων, βοήθημα στάθμευσης, εμπρόσθια/οπίσθια αποφυγή συγκρούσεων, υποστήριξη τυφλού σημείου, υποστήριξη για αλλαγή λωρίδας κυκλοφορίας και για διατήρηση στη λωρίδα, προστασία των ευάλωτων χρηστών του δρόμου (π.χ. πεζοί, ποδηλάτες) και ούτω καθεξής.

Ο σκοπός της παρούσης παραγράφου δεν είναι να αναφερθεί σε όλες αυτές τις εφαρμογές, αλλά να τονίσει τις πιο σημαντικές από αυτές καθώς και αυτές που θα συμβάλουν στη μείωση των ατυχημάτων στους δρόμους και κατ' επέκταση των θανάτων που προέρχονται από αυτά.

Ασφάλεια στις διασταυρώσεις

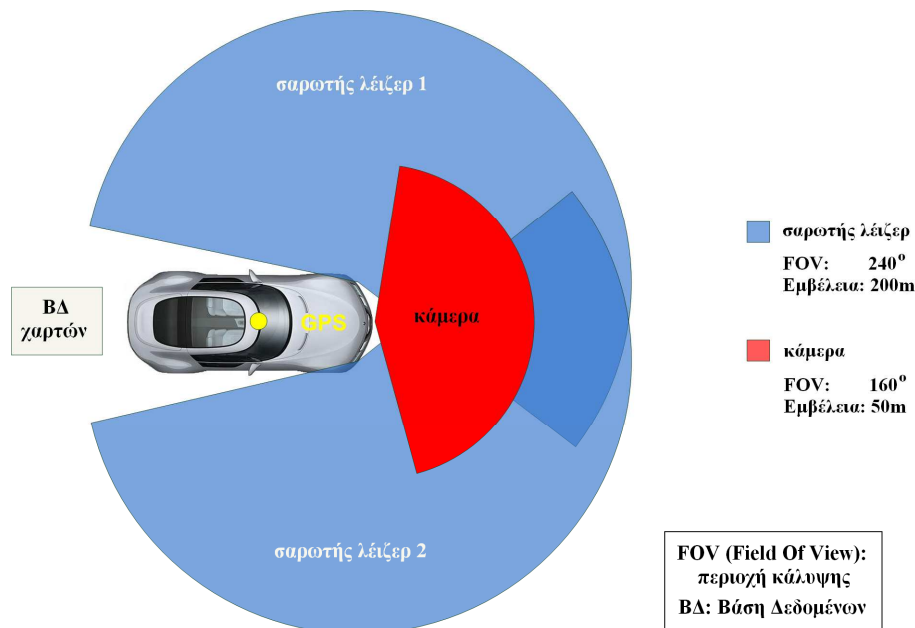
Οι διασταυρώσεις αποτελούν το σημαντικότερο σημείο ατυχημάτων σύμφωνα με τις στατιστικές. Πάνω από το 30% του συνόλου των ατυχημάτων που προκαλούν τραυματισμούς στην Ευρώπη πραγματοποιείται στις διασταυρώσεις. Ο στόχος των εφαρμογών ασφάλειας στις διασταυρώσεις είναι να βοηθήσει και να προστατεύσει όχι μόνο τους οδηγούς, αλλά και τους ευάλωτους χρήστες του δρόμου (π.χ. πεζούς, ποδηλάτες). Τα σενάρια των ατυχημάτων στις διασταυρώσεις είναι από τα πιο περίπλοκα, δεδομένου ότι οι διασταυρώσεις κατακλύζονται από πολλούς και διαφορετικούς χρήστες του οδικού δικτύου οι οποίοι πλησιάζουν από διαφορετικές κατευθύνσεις. Μερικά παραδείγματα τέτοιων σεναρίων ατυχημάτων είναι τα εξής:

- Οι συγκρούσεις με επερχόμενη/διασταυρούμενη κυκλοφορία στρίβοντας σε μία διασταύρωση ή διασχίζοντάς την.
- Η παραβίαση του φωτεινού σηματοδότη.

Για την αποφυγή τέτοιων ατυχημάτων είναι αναγκαία η εγκατάσταση προηγμένων συστημάτων αισθητήρων στο αυτοκίνητο, αλλά ακόμη και τέτοιου είδους αισθητήρες ίσως δεν αρκούν. Η εκμετάλλευση της ασύρματης συνεργασίας μεταξύ των χρηστών του οδικού δικτύου και ειδικότερα η υποστήριξη από σταθμούς βάσης στις διασταυρώσεις είναι περισσότερο από απαραίτητη. Στην παράγραφο αυτή η ανάλυση θα περιοριστεί στα συστήματα εντός του αυτοκινήτου. Στην Εικόνα 8 φαίνεται ένα παράδειγμα εξοπλισμένου αυτοκινήτου με προηγμένους αισθητήρες για σενάρια διασταύρωσης.

Οι βασικοί παράγοντες σε μία διασταύρωση είναι η χρήση αισθητήρων με ευρεία περιοχή κάλυψης, όπως οι σαρωτές λέιζερ, και ο εντοπισμός της θέσης του αυτοκινήτου στη διασταύρωση με ιδιαίτερα μεγάλη ακρίβεια. Ο σαρωτής λέιζερ μπορεί να ανιχνεύσει άλλα αυτοκίνητα, πεζούς, δικυκλιστές και άλλα φυσικά χαρακτηριστικά (π.χ. κράσπεδο). Η κάμερα, μετά από επεξεργασία εικόνας, μπορεί να εξάγει πληροφορίες σχετικά με τις λωρίδες. Εξαιρετικά ακριβής εντοπισμός της θέσης του αυτοκινήτου μπορεί να πραγματοποιηθεί μετά από σύντηξη πληροφοριών από την κάμερα, το σαρωτή λέιζερ καθώς και δεδομένα

χαρτών που προέρχονται από έναν λεπτομερή χάρτη της διασταύρωσης με τη χρήση ενός GPS/DGPS αισθητήρα.



Εικόνα 8: Εξοπλισμένο αυτοκίνητο για εφαρμογές ασφάλειας σε διασταύρωση

Ασφαλής ταχύτητα και απόσταση

Η εφαρμογή αυτή ανήκει στην γενικότερη κατηγορία των συστημάτων υποστήριξης στον διαμήκη άξονα, η οποία περιλαμβάνει τον προσαρμοστικό έλεγχο πλοήγησης (ACC), την εμπρόσθια/οπίσθια αποφυγή σύγκρουσης, τη λειτουργικότητα «σταμάτα ξεκίνα» (stop and go) κλπ. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι τα συστήματα ACC ήταν τα πρώτα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν σε ένα αυτοκίνητο, τα οποία έκαναν χρήση ενός αισθητήρα ραντάρ μακρινής εμβέλειας. Ο στόχος του ACC ήταν να προσαρμόζει αυτόματα την ταχύτητα του αυτοκινήτου καθώς και την απόσταση από το προπορευόμενο αυτοκίνητο. Η εφαρμογή ασφαλούς ταχύτητας και ασφαλούς απόστασης είναι μια επέκταση του παραδοσιακού συστήματος ACC.

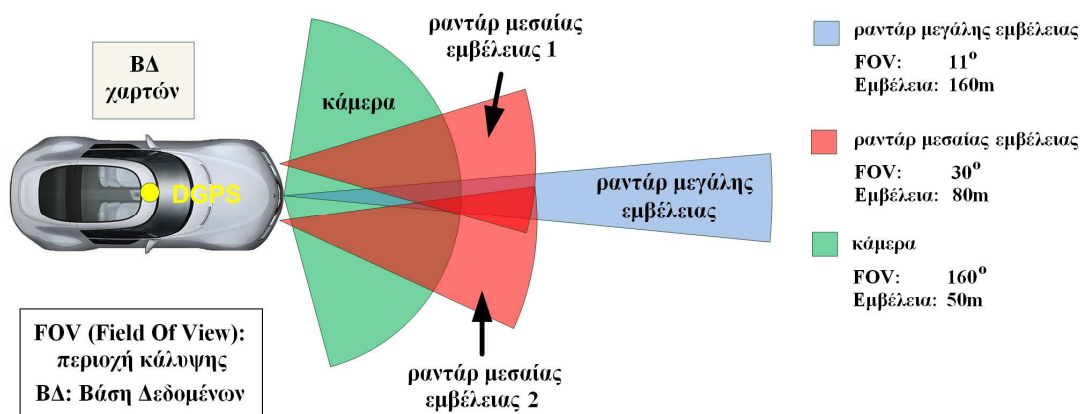
Στην Ευρώπη πολλά αυτοκινητιστικά ατυχήματα συμβαίνουν εξαιτίας της ακατάλληλης ταχύτητας του αυτοκινήτου ή της μη τήρησης της απόστασης ασφαλείας από το προπορευόμενο αυτοκίνητο. Έχει υπολογιστεί ότι η υπερβολική ταχύτητα στους ευρωπαϊκούς δρόμους συμβάλλει στο θάνατο 1.200 ανθρώπων και στον τραυματισμό περισσότερων από 100.000 ετησίως⁶. Επιπλέον, οι οπίσθιες συγκρούσεις και τα ατυχήματα «καραμπόλες» αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό μέρος των τροχαίων ατυχημάτων στην Ευρώπη.

Ο στόχος μιας εφαρμογής ασφαλούς ταχύτητας και ασφαλούς απόστασης είναι να βοηθήσει τον οδηγό στην αποφυγή ατυχημάτων που σχετίζονται με υπερβολική ταχύτητα ή πολύ μικρή απόσταση από το προπορευόμενο αυτοκίνητο. Πιο συγκεκριμένα, το σύνολο των αισθητήρων ενός τέτοιου συστήματος

⁶ Τα στατιστικά αυτά στοιχεία προέρχονται από την CARE (ευρωπαϊκή βάση δεδομένων για ατυχήματα)

αποτελείται από ένα ραντάρ μακρινής εμβέλειας και δύο ραντάρ μεσαίας εμβέλειας για την ανίχνευση εμποδίων, ένα σύστημα όρασης για την ανίχνευση των λωρίδων και το συνδυασμό του διαφορικού GPS με δεδομένα από ψηφιακό χάρτη για την εύρεση της θέσης στο παγκόσμιο σύστημα αναφοράς.

Στην Εικόνα 9 απεικονίζεται ένα εξοπλισμένο αυτοκίνητο κατάλληλο για εφαρμογές ασφαλούς ταχύτητας και ασφαλούς απόστασης.



Εικόνα 9: Εξοπλισμένο αυτοκίνητο για εφαρμογές ασφαλούς ταχύτητας και απόστασης

Η σύντηξη δεδομένων πραγματοποιείται σε πολλαπλά επίπεδα προκειμένου να παρέχει μια πιο ολοκληρωμένη άποψη του περιβάλλοντος. Το διαφορικό GPS και οι αδρανειακοί αισθητήρες συνδυάζονται με δεδομένα χαρτών με σκοπό την απόκτηση μιας πιο ακριβούς θέσης. Τα δεδομένα από τα ραντάρ συντήνονται και επιτυγχάνεται μια πιο ολοκληρωμένη αναπαράσταση του περιβάλλοντος. Επίσης, στην εφαρμογή αυτή οι προβλεπόμενες τροχιές του υποκείμενου αυτοκινήτου και των άλλων αυτοκινήτων διαδραματίζουν βασικό ρόλο.

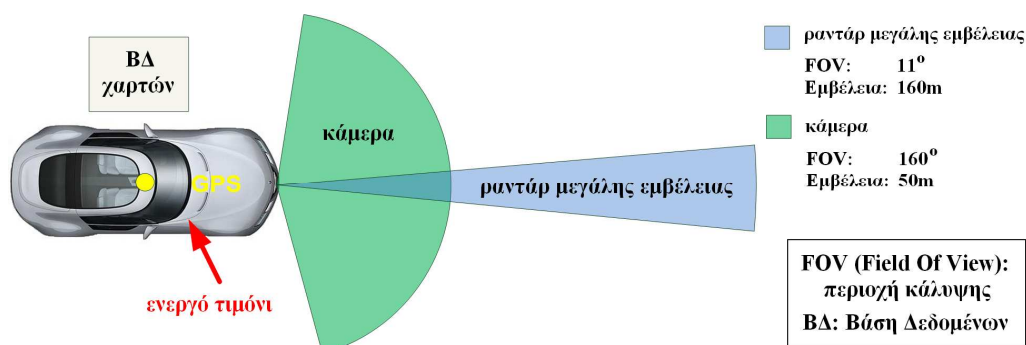
Υποστήριξη διατήρησης λωρίδας

Η υποστήριξη διατήρησης λωρίδας μπορεί να θεωρηθεί ως μέλος της οικογένειας των εφαρμογών πλευρικής ασφάλειας. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει επίσης και άλλες σημαντικές εφαρμογές, όπως η υποβοήθηση αλλαγής λωρίδας, αποφυγή πλευρικής σύγκρουσης και προειδοποίηση αναχώρησης από τη λωρίδα. Ο σκοπός των συστημάτων υποστήριξης για διατήρηση λωρίδας είναι να βοηθήσουν τον οδηγό να διατηρήσει το αυτοκίνητο με ασφάλεια στη λωρίδα του. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται συστήματα αισθητήρων που βασίζονται στην όραση, τα οποία παρατηρούν την καμπυλότητα του δρόμου και τη θέση του αυτοκινήτου στη λωρίδα. Σε αντίθεση με άλλα συστήματα προειδοποίησης ασφαλείας, το σύστημα υποστήριξης διατήρησης λωρίδας χρησιμοποιεί έναν ενεργοποιητή (actuator), ο οποίος εφαρμόζει μια δόνηση στο τιμόνι για να προειδοποιηθεί ο οδηγός ώστε να διατηρήσει το υποκείμενο αυτοκίνητο στη λωρίδα.

Ο αντικειμενικός σκοπός των συστημάτων υποστήριξης διατήρησης λωρίδας δεν είναι να ελέγχουν το αυτοκίνητο εντελώς αυτόματα, αλλά κυρίως να δίνουν στον οδηγό μια διαισθητική υποστήριξη με την

περιστροφή του τιμονιού προς τη σωστή κατεύθυνση. Ωστόσο, ο οδηγός πρέπει να αντιδράσει και να πάρει τον έλεγχο του αυτοκινήτου, ώστε να αποφευχθεί η έξοδος από μία λωρίδα.

Εάν το σύστημα ανιχνεύσει μια απόκλιση από τη λωρίδα, εκδίδει μια προειδοποίηση προς τον οδηγό και την ίδια στιγμή θέτει σε λειτουργία τον ενεργοποιητή του συστήματος διεύθυνσης του τιμονιού. Η προσέγγιση αυτή εκμεταλλεύεται τη σύντηξη δεδομένων μεταξύ κάμερας, ψηφιακών χαρτών και άλλων ενεργών αισθητήρων όπως τα ραντάρ ή οι σαρωτές λέιζερ. Το γεγονός ότι το σύστημα περιλαμβάνει έναν ενεργοποιητή σημαίνει ότι το σύστημα είναι ένα «σιληρό» σύστημα πραγματικού χρόνου. Αυτό με τη σειρά του θέτει αυστηρές προδιαγραφές στην απόδοση των αλγορίθμων σύντηξης δεδομένων. Η Εικόνα 10 δείχνει ένα εξοπλισμένο αυτοκίνητο που υποστηρίζει τις εφαρμογές για τη διατήρηση στη λωρίδα.



Εικόνα 10: Εξοπλισμένο αυτοκίνητο για εφαρμογές υποστήριξης διατήρησης λωρίδας

1.3 Ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων

Κατά την τελευταία δεκαετία, η πρόοδος στις τεχνολογίες αισθητήρων και ο μείζον στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης να μειωθούν στο μισό τα τροχαία ατυχήματα και οι θάνατοι που προέρχονται από αυτά έως το 2010, οδήγησε στην εξέλιξη των προηγμένων συστημάτων υποστήριξης οδηγού (advanced driver assistance systems - ADAS). Η σύντηξη των δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικούς προηγμένους αισθητήρες, εγκατεστημένους εντός του αυτοκινήτου, ήταν αρχικά στο κέντρο αυτής της προσπάθειας. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή πάσχει από σοβαρούς περιορισμούς. Πιο συγκεκριμένα:

- Η αντίληψη του περιβάλλοντος του αυτοκινήτου δεν μπορεί να υπερβεί την απόσταση ανίχνευσης των αισθητήρων.
- Τα συστήματα αισθητήρων δεν μπορούν να έχουν καλές επιδόσεις σε όλα τα περιβάλλοντα (το αστικό οδικό δίκτυο αποτελεί μια μεγάλη πρόκληση).
- Σε πολλές περιπτώσεις το σύστημα δεν είναι σε θέση να αντιληφθεί την κατάσταση εγκαίρως ώστε να προειδοποιήσει τον οδηγό και να προτείνει διορθωτική πράξη.
- Το κόστος των συστημάτων αισθητήρων είναι πολύ υψηλό και έτσι η εγκατάστασή τους είναι εφικτή μόνο σε πολυτελή αυτοκίνητα.

Ωστόσο, πρόσφατα υπάρχει σημαντική εν εξελίξει έρευνα πάνω στα συνεργατικά αυτοκίνητα, η οποία επικεντρώνεται στην αντιμετώπιση όλων των παραπάνω περιορισμών. Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη επικοινωνίας: σταθμός βάσης-με-αυτοκίνητο και αυτοκίνητο-με-αυτοκίνητο (βλέπε Εικόνα 11). Επιπλέον, η εκμετάλλευση των ασύρματων επικοινωνιών στο περιβάλλον των αυτοκινήτων θα ενισχύσει και θα διευρύνει τις προς το παρόν διαθέσιμες εφαρμογές ασφαλείας και άνεσης (π.χ. στήριξη σε σήραγγα, αναβάθμιση της ασφάλειας σε διασταυρώσεις, διαδίκτυο στο αυτοκίνητο, οικολογική οδήγηση). Μια συνεργατική εφαρμογή προειδοποίησης σύγκρουσης παρουσιάζεται λεπτομερώς στο [28].



Εικόνα 11: Αυτοκίνητα που συνεργάζονται με άλλα αυτοκίνητα και με σταθμούς βάσης

Το περιορισμένο εύρος ζώνης, τα θέματα ασφαλείας, η προστασία της ιδιωτικής ζωής, η αξιοπιστία και η διάδοση είναι μερικά από τα μειονεκτήματα που προκύπτουν από την ασύρματη συνδεσιμότητα στα αυτοκίνητα. Για όλους τους παραπάνω λόγους νέες οργανώσεις, πρωτοβουλίες και ομάδες εργασίας δημιουργήθηκαν (π.χ. DSRC, WAVE, C2C-CC).

Επιπροσθέτως, νέες προκλήσεις τίθενται στη διαδικασία της σύντηξης δεδομένων. Η συσχέτιση και ο συγχρονισμός των δεδομένων από τους αισθητήρες του αυτοκινήτου σε συνδυασμό με τα δεδομένα από το ασύρματο δίκτυο είναι η κύρια πρόκληση. Επιπλέον, ο χειρισμός των καθυστερημένων πληροφοριών καθώς και η αξιοπιστία των πληροφοριών που μεταφέρονται μέσω του δικτύου είναι άλλα σημαντικά ζητήματα.

1.3.1 Χαρακτηριστικά του ασύρματου δικτύου αυτοκινήτων

Τα χαρακτηριστικά ενός αυτο-οργανούμενου δικτύου αυτοκινήτων (vehicular ad hoc network - VANET) είναι μοναδικά σε σύγκριση με άλλα αυτο-αργανούμενα δίκτυα κινητών (mobile ad hoc network - MANET) [29]. Οι ξεχωριστές ιδιότητες ενός VANET προσφέρουν ευκαιρίες για την αύξηση της

απόδοσης του δικτύου, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζονται σημαντικές προκλήσεις. Ακολουθούν κάποια χαρακτηριστικά των VANETs που αποτελούν και τις κυριότερες διαφορές τους από τα MANETs:

- Ένα VANET χαρακτηρίζεται από ταχεία, αλλά κάπως προβλέψιμη, αλλαγή τοπολογίας.
- Ο κατακερματισμός του εμφανίζεται συχνά, λόγω της μεγάλης ταχύτητας των κόμβων-αυτοκινήτων και του μειωμένου αριθμού των αυτοκινήτων σε κάποιες περιοχές π.χ. αγροτικοί δρόμοι.
- Η ενεργή διάμετρος του είναι μικρή.
- Ο πλεονασμός (redundancy) σε ένα VANET είναι περιορισμένος τόσο χρονικά όσο και λειτουργικά. Αντίθετα σε ένα MANET είναι ζωτικής σημασίας για την παροχή επιπλέον εύρους ζώνης και για την ασφάλεια. Για παράδειγμα, αν είναι επιθυμητό επιπλέον εύρος ζώνης, μπορούν να προστεθούν περισσότεροι κόμβοι. Επίσης, σχήματα ασφάλειας χρησιμοποιούν ανεξάρτητες πλεονάζουσες διαδρομές για την ασφαλή μεταφορά μηνυμάτων. Αυτό δεν είναι εύκολο να γίνει σε ένα VANET.
- Θέτει μια σειρά από μοναδικές προκλήσεις ασφαλείας.
- Είναι πιθανή η τοποθέτηση στρατηγικών σημείων πρόσβασης κατά μήκος του δρόμου, τα οποία με τη σειρά τους να επιτρέπουν στα αυτοκίνητα να έχουν πρόσβαση σε υπηρεσίες διαθέσιμες από την υποδομή (infrastructure), ενώ αντίθετα σε ένα MANET δεν υπάρχει διαθέσιμη υποδομή.

Οι παράμετροι κλειδιά για την καλή επίδοση ενός VANET είναι ο χαμηλός χρόνος απόκρισης (latency) και η διατήρηση της ρυθμαπόδοσης (throughput) του συστήματος (ή αλλιώς το ποσοστό των γειτονικών αυτοκινήτων που επιτυχώς λαμβάνουν μηνύματα προειδοποίησης). Όσον αφορά το χρόνο απόκρισης όταν δύο αυτοκίνητα επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους ο χρόνος μετάδοσης του μηνύματος πρέπει γενικά να είναι μικρότερος από 100ms. Τώρα, όσον αφορά τη ρυθμαπόδοση θα πρέπει να διατηρείται σε ικανοποιητικά επίπεδα σε όλο το δίκτυο και να μην μειώνεται σημαντικά με τον αριθμό των ενδιάμεσων αυτοκινήτων που δρομολογούν το μήνυμα από την προέλευση στον προορισμό (hops).

Η τοπολογία ενός VANET, παρότι είναι κάπως προβλέψιμη λόγω των φυσικών περιορισμών του δρόμου, αλλάζει συχνά λόγω της υψηλής κινητικότητας των αυτοκινήτων. Εξαιτίας των συχνών αλλαγών τοπολογίας, ο χρόνος που διαρκεί η σύνδεση επικοινωνίας μεταξύ δύο αυτοκινήτων είναι σύντομη. Ο λόγος για τον οποίο η σύνδεση σε ένα VANET διαρκεί λίγο είναι ότι τα αυτοκίνητα ταξιδεύουν σε υψηλές ταχύτητες, προσεγγίζοντας έως και τα 200 km/h. Μία λύση για την αύξηση της διάρκειας κατά την οποία η σύνδεση είναι έγκυρη είναι η αύξηση της ισχύος μετάδοσης. Το πρόβλημα που σχετίζεται με την αύξηση της ακτίνας μετάδοσης ενός αυτοκινήτου, προκειμένου να διατηρηθεί η σύνδεση επικοινωνίας, είναι ότι μειώνεται επίσης η ρυθμαπόδοση του δικτύου. Όταν αυτοκίνητα ταξιδεύουν σε αντίθετες κατευθύνσεις μια σύνδεση διατηρείται για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Ακόμη και όταν τα αυτοκίνητα ταξιδεύουν προς την ίδια κατεύθυνση, με κάθε αυτοκίνητο να έχει μια ακτίνα μετάδοσης 200 m, η ασύρματη σύνδεση μεταξύ τους διαρκεί κατά μέσο όρο για περίπου ένα λεπτό. Επειδή τα αυτοκίνητα παρουσιάζουν υψηλό βαθμό κινητικότητας, είναι δύσκολο να διατηρηθεί οποιαδήποτε μορφή συμμετοχής σε ομάδα. Για παράδειγμα, είναι δύσκολο να καθοριστεί ένας ακριβής κατάλογος των γειτονικών αυτοκινήτων. Πρωτόκολλα που

βασίζονται στο σχηματισμό ομάδων είναι δύσκολο να εφαρμοστούν σε ένα VANET. Παρόλα αυτά, η τοπολογία ενός VANET είναι επίσης ωφέλιμη γιατί η κίνηση ενός αυτοκινήτου περιορίζεται από το δρόμο και επομένως η μελλοντική κίνησή του είναι προβλέψιμη.

Για την αρχική ανάπτυξη ενός VANET υπάρχει το πρόβλημα ότι μόνο ένα μικρό ποσοστό των αυτοκινήτων που βρίσκονται στους δρόμους είναι εξοπλισμένα με πομποδέκτες. Ο περιορισμένος αριθμός των αυτοκινήτων με πομποδέκτες θα οδηγήσει συχνά σε κατακεραματισμό του δικτύου, με αποτέλεσμα ένα μέρος του δικτύου να είναι απροσπέλαστο. Ακόμα και όταν ένα VANET έχει αναπτυχθεί πλήρως, ο κατακεραματισμός μπορεί να υπάρχει σε αγροτικές περιοχές ή σε περιόδους αραιής κυκλοφορίας, όπως συμβαίνει αργά τη νύχτα. Δεδομένου ότι μπορεί να περάσουν χρόνια πριν η πλειονότητα των αυτοκινήτων να είναι εξοπλισμένη με πομποδέκτες, τα πρωτόκολλα VANET δεν θα πρέπει να υποθέσουν ότι όλα τα αυτοκίνητα μπορούν να επικοινωνούν.

Ένα αποτέλεσμα της ανεπαρκούς συνδεσιμότητας μεταξύ των κόμβων είναι ότι η ενεργή διάμετρος του δικτύου είναι μικρή. Για το λόγο αυτό, δεν είναι ρεαλιστικό για έναν κόμβο να διατηρεί την πλήρη καθολική τοπολογία του δικτύου. Η περιορισμένη ενεργή διάμετρος καταλήγει σε προβλήματα όταν προσπαθούν να εφαρμοστούν οι υπάρχοντες αλγόριθμοι δρομολόγησης σε ένα VANET. Τα παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι είτε προ-ενεργητικά (proactive) ή αντιδραστικά (reactive). Οι προ-ενεργητικοί αλγόριθμοι δρομολόγησης διατηρούν διαδρομές χρησιμοποιώντας πίνακες. Συχνές ανταλλαγές δεδομένων μεταξύ των κόμβων απαιτούνται για να διατηρηθούν οι πληροφορίες δρομολόγησης έγκυρες. Επειδή η τοπολογία αλλάζει τόσο γρήγορα, οι διαδρομές που διατηρούνται στους πίνακες δρομολόγησης γρήγορα καθίστανται άκυρες. Παραδοσιακά οι προσεγγίσεις δρομολόγησης που βασίζονται σε πίνακες καταναλώνουν πολύ εύρος ζώνης. Από την άλλη, η αντιδραστική δρομολόγηση αποσκοπεί στην εγκατάσταση μιας διαδρομής μόνον όταν είναι απαραίτητο. Το πρόβλημα με την αντιδραστική προσέγγιση είναι ότι η διαδρομή πρέπει να καθοριστεί πριν σταλεί το πρώτο πακέτο, γεγονός που αυξάνει το χρόνο που χρειάζεται για να σταλεί ένα μήνυμα. Καμία από τις δύο αυτές προσεγγίσεις δεν αποδίδει ιδιαίτερα καλά σε ένα VANET. Το πρόβλημα με την προ-ενεργητική προσέγγιση είναι ότι δεν διευρύνεται εύκολα. Το πρόβλημα με την αντιδραστική προσέγγιση είναι ότι ακόμη και όταν μια διαδρομή για έναν προορισμό βρίσκεται λίγο πριν τη μετάδοση ενός μηνύματος, αυτή η διαδρομή μπορεί επίσης να είναι έγκυρη για πολύ λίγο εξαιτίας της κινητικότητας των κόμβων. Επιπροσθέτως, η αναμενόμενη διάρκεια ζωής μιας διαδρομής μειώνεται καθώς ο αριθμός των αναμεταδόσεων (hops) αυξάνεται. Μια διαδρομή μπορεί να πάψει να υπάρχει σχεδόν με το που ανακαλυφθεί. Η αποστολή ενός μηνύματος σε απόσταση μεγαλύτερη από τρεις ή τέσσερις αναμεταδόσεις (hops), χρησιμοποιώντας παραδοσιακούς ad hoc αλγορίθμους δρομολόγησης, είναι πιθανό να οδηγήσει σε σφάλμα δρομολόγησης.

Ο πλεονασμός είναι ζωτικής σημασίας για την παροχή ειδικών υπηρεσιών όπως είναι η ασφάλεια. Σε ένα VANET ο πλεονασμός είναι περιορισμένος τόσο χρονικά όσο και λειτουργικά. Από τη στιγμή που οι σύνδεσμοι μεταξύ των κόμβων αδυνατούν να υφίστανται για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα, είναι εξαιρετικά δύσκολο να εφαρμοστεί οποιασδήποτε μορφής πλεονασμός.

Η προστασία της ιδιωτικής ζωής καθώς και η ασφάλεια είναι άλλα θέματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Πρώτον, προκειμένου να κερδηθεί υποστήριξη για την υιοθέτηση ενός VANET πρέπει να

διατηρηθεί η ανωνυμία του οδηγού. Για παράδειγμα, το ευρύ κοινό είναι απίθανο να υποστηρίξει ένα VANET εάν η κίνηση του οδηγού καταγράφεται. Αν χαρακτηριστικά ανωνυμίας δεν συμπεριλαμβάνονται, θα ήταν δυνατόν σε τρίτους να παρακολουθούν καθημερινά τις δραστηριότητες του οδηγού. Για το λόγο αυτό, χρειάζονται μηχανισμοί που να διασφαλίζουν την ιδιωτική ζωή του οδηγού. Δεύτερον, ένα VANET απαιτεί υψηλό βαθμό ασφάλειας. Δεν θα πρέπει να είναι δυνατόν να παρεμβαίνει κανείς στα μηνύματα του VANET. Η παραποίηση των μηνυμάτων ασφαλείας θα οδηγήσει στην πραγματοποίηση τροχαίων ατυχημάτων, τα οποία το σύστημα σχεδιάστηκε να αποτρέπει. Αν αυστηρά μέτρα ασφαλείας δεν τεθούν σε εφαρμογή, ένας εισβολέας θα μπορούσε να διαδώσει ψευδή στοιχεία στο δίκτυο με αποτέλεσμα η ροή της κυκλοφορίας να μεταβληθεί και να προκληθεί χάος στο σύστημα μεταφορών.

Αυτές είναι μερικές από τις μοναδικές προκλήσεις που σχετίζονται με ένα VANET. Αυτά δεν είναι τα μοναδικά χαρακτηριστικά ενός VANET, αλλά δίνουν μια βασική κατανόηση ορισμένων από τα σημαντικότερα θέματα εφαρμογής του.

1.3.2 Δραστηριότητες προτυποποίησης και Ευρωπαϊκά έργα

Σημαντικές δραστηριότητες στον τομέα της επικοινωνίας αυτοκινήτων είναι υπό εξέλιξη διεθνώς αυτή την περίοδο. Μερικές από αυτές είναι οι ακόλουθες: η δέσμευση της συχνότητας των 5.9 GHz και η αντίστοιχη ζώνη συχνοτήτων που είναι χωρισμένη σε 7 κανάλια (DSRC – Dedicated Short Range Communications) [30], ο ορισμός μιας ομάδας από την IEEE για την δημιουργία μιας σειράς πρωτοκόλλων αντίστοιχων με τα WiFi προσαρμοσμένα για τις ανάγκες των αυτοκινήτων (WAVE – Wireless Access in Vehicular Environments ή IEEE 1609) [31] και μία αρχιτεκτονική για την προτυποποίηση του συνόλου των πρωτοκόλλων και των παραμέτρων για μεσαίας και μεγάλης εμβέλειας, υψηλής ταχύτητας επικοινωνία μεταξύ αυτοκινήτων, χρησιμοποιώντας ένα ή περισσότερα μέσα (CALM - Continuous Air-interface, Long and Medium range) [32,33]. Επιπλέον, διάφοροι οργανισμοί, όπως η Κοινοπραξία για την επικοινωνία αυτοκινήτου-με-αυτοκίνητο (CAR 2 CAR Communication Consortium - C2C-CC) [34,35] και το Ινστιτούτο Προτύπων Ευρωπαϊκών Τηλεπικοινωνιών (European Telecommunications Standards Institute - ETSI) [36] εργάζονται για την καθιέρωση, προώθηση και τη διαλειτουργικότητα των απαραίτητων προτύπων. Τέλος, κάποια ευρωπαϊκά ερευνητικά προγράμματα που ασχολούνται με επικοινωνία αυτοκινήτων είναι το SAFESPOT [37], το CVIS [38] και το COOPERS [39].

Οργανισμοί

- **C2C-CC**

Το C2C-CC είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός που ξεκίνησε από Ευρωπαίους κατασκευαστές αυτοκινήτων και ο οποίος είναι ανοικτός για τους προμηθευτές αισθητήρων, ερευνητικούς οργανισμούς και άλλους εταιρείες. Το C2C-CC έχει αφοσιωθεί στον εξής αντικειμενικό σκοπό: περαιτέρω αύξηση της οδικής ασφάλειας και αποδοτικότητας μέσα από την χρήση επικοινωνίας μεταξύ των αυτοκινήτων. Επίσης, στόχος

του C2C-CC είναι να τυποποιήσει τις διεπαφές και τα πρωτόκολλα των ασύρματων επικοινωνιών μεταξύ των αυτοκινήτων και του περιβάλλοντός τους, με σκοπό να γίνουν τα αυτοκίνητα των διαφορετικών κατασκευαστών διαλειτουργικά και επίσης να μπορούν να επικοινωνούν με τους οδικούς σταθμούς βάσης.

Πιο συγκεκριμένα, η αποστολή και οι αντικειμενικοί στόχοι του C2C-CC είναι:

- Η δημιουργία και η καθιέρωση ενός ανοιχτού ευρωπαϊκού βιομηχανικού προτύπου για τα συστήματα επικοινωνίας μεταξύ των αυτοκινήτων που βασίζονται σε μονάδες ασύρματου δικτύου LAN και η διασφάλιση σε ευρωπαϊκό επίπεδο της διαλειτουργικότητας μεταξύ των αυτοκινήτων.
- Να καταστεί δυνατή η ανάπτυξη των εφαρμογών ενεργητικής ασφάλειας, καθορίζοντας, τυποποιώντας και επιδεικνύοντας το σύστημα επικοινωνίας αυτοκινήτου-με-αυτοκίνητο.
- Να προωθήσει τη χορήγηση μιας πανευρωπαϊκής, αποκλειστικής, χωρίς χρέωση ζώνης συχνοτήτων για εφαρμογές επικοινωνίας αυτοκινήτου-με-αυτοκίνητο.
- Να προωθήσει την εναρμόνιση των προτύπων επικοινωνίας αυτοκινήτου-με-αυτοκίνητο σε παγκόσμιο επίπεδο.
- Η ανάπτυξη ρεαλιστικών στρατηγικών ανάπτυξης και επιχειρηματικών μοντέλων για να επιταχυνθεί η διείσδυση στην αγορά.

▪ ETSI

Ο ETSI είναι ένας ευρωπαϊκός οργανισμός προτυποποίησης της βιομηχανίας τηλεπικοινωνιών στην Ευρώπη, ευρέως γνωστός για τα πρότυπα του για GSM, TISPAN (Telecommunications and Internet converged Services and Protocols for Advanced Networking) κλπ. Προς το τέλος του 2007, δημιούργησε μία νέα τεχνική επιτροπή για τα έξυπνα συστήματα μεταφορών (Intelligent Transport Systems - ITS), την TC ITS. Η επιτροπή αυτή θα αναπτύξει πρότυπα και προδιαγραφές για την παροχή υπηρεσιών ITS στην Ευρώπη. Η TC ITS είναι οργανωμένη στις ακόλουθες πέντε ομάδες εργασίας:

- 1.WG 1 Απαιτήσεις χρηστών και εφαρμογών
- 2.WG 2 Αρχιτεκτονική και θέματα μεταξύ των στρωμάτων αυτής
- 3.WG 3 Μεταφορές και δίκτυο
- 4.WG 4 Μέσα μετάδοσης και σχετικά θέματα
- 5.WG 5 Ασφάλεια

Η εργασία της συγκεκριμένης επιτροπής μόλις έχει ξεκινήσει και είναι γενικά αναμενόμενο ότι ο ETSI θα παίξει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του συστήματος των έξυπνων συστημάτων μεταφορών και των αντίστοιχων προτύπων στην Ευρώπη. Ο σκοπός αυτής της επιτροπής δεν είναι περιορισμένος στην ασύρματη επικοινωνία των αυτοκινήτων, αλλά περιλαμβάνει τους διαφορετικούς τύπους μεταφορών (αυτοκίνητο και μοτοσυκλέτα, πεζοί, σιδηροδρομικό δίκτυο, αεροναυτική και λοιπά) και τις τεχνολογίες ασύρματων επικοινωνιών (5GHz, 60GHz, υπέρυθρες, GSM).

Με την έναρξη των εργασιών, οι ομάδες έχουν ήδη συμφωνήσει σε έναν αριθμό αντικειμένων εργασίας για αρκετές από τις πτυχές της επικοινωνίας αυτοκινήτων συμπεριλαμβανομένου των μέσων μετάδοσης, δικτύωση, ασφάλεια και εφαρμογές ασφαλείας. Στην ομάδα WG3, εστιάζουν κυρίως στις προδιαγραφές της ad hoc δικτύωσης που βασίζεται σε γεωγραφική διευθυνσιοδότηση και δρομολόγηση. Για να επιτραπεί η χρήση διαφορετικών μέσων μετάδοσης, οι προδιαγραφές διαχωρίζουν σε λειτουργίες δικτύου που εξαρτώνται από το μέσο μετάδοσης και άλλες που είναι ανεξάρτητες αυτού. Οι προδιαγραφές υποστηρίζονται από άλλες ομάδες εργασίας, οι οποίες συγκεκριμένα απευθύνονται σε θέματα μέσων μετάδοσης και ασφαλείας, όπως ένα ευρωπαϊκό πρότυπο της IEEE 802.11 για τα έξυπνα συστήματα μεταφορών. Η τεχνική επιτροπή αναπτύσσει ένα πλάνο για την εξέλιξη της προτυποποίησης για τα επόμενα χρόνια με σκοπό να πετύχει ένα πλήρες σύνολο προτύπων που κυμαίνονται από αρχιτεκτονική επικοινωνίας έως προδιαγραφές πρωτοκόλλων μαζί με επίσημες διαδικασίες δοκιμών.

Πρότυπα

- **DSRC**

Οι αφοσιωμένες μικρής εμβέλειας επικοινωνίες (Dedicated Short Range Communications-DSRC) είναι υπηρεσίες επικοινωνιών μικρής με μεσαίας εμβέλειας (1000 μέτρα) που υποστηρίζουν τόσο τη δημόσια ασφάλεια όσο και τις ιδιωτικές λειτουργίες σε περιβάλλοντα επικοινωνιών σταθμού βάσης-με-αυτοκίνητο και αυτοκίνητο-με-αυτοκίνητο. Στόχος είναι η παροχή πολύ υψηλών ρυθμών μεταφοράς δεδομένων σε περιπτώσεις όπου η ελαχιστοποίηση της απόκρισης στο σύνδεσμο επικοινωνίας είναι σημαντική.

Το DSRC είναι μόνο για συστήματα δεδομένων και λειτουργεί με ραδιοσυχνότητες στα 5.725 MHz μέχρι 5.875 MHz για την βιομηχανική, επιστημονική και ιατρική (ISM) ζώνη συχνοτήτων. Τα DSRC συστήματα αποτελούνται από μονάδες στην πλευρά του δρόμου (Roadside Units - RSUs) και από μονάδες εγκατεστημένες σε κάθε αυτοκίνητο (On Board Units - OBUs) με πομποδέκτες και αναμεταδότες. Τα πρότυπα του DSRC προσδιορίζουν τις συχνότητες λειτουργίας και το εύρος ζώνης του συστήματος, αλλά επίσης αφήνουν περιθώρια για προαιρετικές συχνότητες που καλύπτονται (στην Ευρώπη) από εθνικούς κανονισμούς.

Τα DSRC συστήματα χρησιμοποιούνται στην πλειονότητα των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αλλά τα συστήματα αυτά δεν είναι πλήρως συμβατά ακόμα. Ως εκ τούτου, η τυποποίηση είναι απαραίτητη για να εξασφαλιστεί πανευρωπαϊκή διαλειτουργικότητα, ιδιαίτερα για εφαρμογές όπως η ηλεκτρονική είσπραξη διοδίων, για την οποία η Ευρωπαϊκή επιτροπή επιβάλλει την ανάγκη διαλειτουργικότητας των συστημάτων.

Η προτυποποίηση θα βοηθήσει την παροχή και την προώθηση πρόσθετων υπηρεσιών με τη χρήση του DSRC, καθώς επίσης θα βοηθήσει και στο να εξασφαλιστεί η συμβατότητα και η διαλειτουργικότητα μέσα σε ένα περιβάλλον πολλαπλών προμηθευτών.

Τα ακόλουθα πρότυπα έχουν δημιουργηθεί από την τεχνική επιτροπή (Technical Committee - TC) 278 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Προτυποποίησης (European Committee for Standardization - CEN) για το DSRC: EN 12253, EN 12795, EN 12834 (ISO 15628) και EN 13372.

▪ WAVE

Ο σχεδιασμός ενός αποτελεσματικού πρωτοκόλλου επικοινωνίας στον τομέα των αυτοκινήτων που ασχολείται με την προστασία των ιδιωτικών δεδομένων, την ασφάλεια, τη διάδοση πολλαπλών καναλιών και τη διαχείριση των πόρων είναι ένα δύσκολο έργο που βρίσκεται υπό εντατική επιστημονική έρευνα. Το συγκεκριμένο έργο έχει ανατεθεί σε μια ειδική ομάδα εργασίας από την IEEE και το σε εξέλιξη σύνολο πρωτοκόλλων είναι το IEEE 1609, ως επί το πλείστον γνωστό και ως WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments).

Τα πρότυπα του WAVE καθορίζουν μία αρχιτεκτονική και ένα συμπληρωματικό, τυποποιημένο σύνολο υπηρεσιών και διασυνδέσεων που επιτρέπουν συλλογικά ασφαλείς ασύρματες επικοινωνίες αυτοκινήτου-με-αυτοκίνητο (V2V) και αυτοκινήτου-με-υποδομή (V2I). Μαζί τα πρότυπα αυτά παρέχουν τη βάση για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στο περιβάλλον μεταφορών, συμπεριλαμβανομένης της ασφάλειας των αυτοκινήτων, την αυτόματη συλλογή διοδίων, τη βελτιωμένη πλοήγηση, τη διαχείριση της κυκλοφορίας και πολλές άλλες.

Η αρχιτεκτονική, οι διεπαφές και τα μηνύματα που ορίζονται στο WAVE υποστηρίζουν τη λειτουργία των ασφαλών ασύρματων επικοινωνιών μεταξύ των αυτοκινήτων και της υποδομής, καθώς και μεταξύ των αυτοκινήτων. Οι εφαρμογές μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα πρότυπα αυτά σε συνδυασμό με εξοπλισμό που σχετίζεται με τη συχνότητα των 5.9 GHz για την παροχή, για παράδειγμα, υπηρεσιών προς τους οδηγούς, τους φορείς εκμετάλλευσης οδικών αξόνων, φορείς εκμετάλλευσης των εγκαταστάσεων και του προσωπικού συντήρησης.

Η οικογένεια προτύπων του WAVE αποτελείται από τέσσερα πρότυπα δοκιμαστικής χρήσης, ενώ τα αντίστοιχα πρότυπα πλήρους χρήσης είναι υπό ανάπτυξη, καθώς και από δύο αδημοσίετα πρότυπα που είναι υπό ανάπτυξη:

➤ **IEEE P1609.0 – Πρόχειρο πρότυπο για ασύρματη πρόσβαση σε περιβάλλον αυτοκινήτων (WAVE) - Αρχιτεκτονική**

Στο πρότυπο αυτό περιγράφεται η αρχιτεκτονική του WAVE και οι απαραίτητες υπηρεσίες για την επικοινωνία DSRC/WAVE συσκευών πολλαπλών διαύλων σε περιβάλλον κινούμενων αυτοκινήτων.

➤ **IEEE 1609.1-2006 – Πρότυπο δοκιμαστικής χρήσης για ασύρματη πρόσβαση σε περιβάλλον αυτοκινήτων (WAVE) - Διαχειριστής πόρων**

Το πρότυπο αυτό καθορίζει τις υπηρεσίες και τις διεπαφές της εφαρμογής διαχείρισης πόρων του WAVE. Περιγράφει τις υπηρεσίες δεδομένων και διαχείρισης που υπάρχουν στην αρχιτεκτονική του WAVE. Καθορίζει τη μορφή των μηνυμάτων εντολής και τις κατάλληλες αποκρίσεις σε αυτά

τα μηνύματα, τη μορφή των αποθηκευμένων δεδομένων που πρέπει να χρησιμοποιηθεί από τις εφαρμογές για την επικοινωνία μεταξύ των διαφόρων τμημάτων αρχιτεκτονικής, καθώς και τη μορφή των μηνυμάτων κατάστασης και αίτησης.

➤ **IEEE 1609.2-2006 – Πρότυπο δοκιμαστικής χρήσης για ασύρματη πρόσβαση σε περιβάλλον αυτοκινήτων (WAVE) - Υπηρεσίες ασφαλείας για εφαρμογές και μηνύματα διαχείρισης**

Στο πρότυπο αυτό καθορίζονται η επεξεργασία και η μορφή των μηνυμάτων ασφαλείας. Το πρότυπο αυτό επίσης καθορίζει τις περιστάσεις για την ανταλλαγή μηνυμάτων ασφαλείας καθώς και τον τρόπο με τον οποίο αυτά τα μηνύματα θα πρέπει να επεξεργάζονται με βάση το σκοπό της ανταλλαγής.

➤ **IEEE 1609.3-2007 – Πρότυπο δοκιμαστικής χρήσης για ασύρματη πρόσβαση σε περιβάλλον αυτοκινήτων (WAVE) - Υπηρεσίες δικτύωσης**

Στο πρότυπο αυτό καθορίζονται οι υπηρεσίες του στρώματος δικτύου και μεταφοράς, συμπεριλαμβανομένου της διευθυνσιοδότησης και της δρομολόγησης, με σκοπό την υποστήριξη της ασφαλούς ανταλλαγής δεδομένων στα πλαίσια του WAVE. Επίσης, το πρότυπο αυτό καθορίζει σύντομα μηνύματα WAVE παρέχοντας έτσι μια αποδοτική, ειδικά για το WAVE, εναλλακτική λύση στο IPv6 (Internet Protocol version 6) που μπορεί να υποστηριχθεί απευθείας από τις εφαρμογές. Επιπλέον, το πρότυπο αυτό καθορίζει τη βάση διαχείρισης των πληροφοριών (Management Information Base - MIB) για τη στοίβα πρωτοκόλλων του WAVE.

➤ **IEEE 1609.4-2006 – Πρότυπο δοκιμαστικής χρήσης για ασύρματη πρόσβαση σε περιβάλλον αυτοκινήτων (WAVE) - Λειτουργίες πολλαπλών διαύλων**

Το πρότυπο αυτό παρέχει βελτιώσεις στο στρώμα MAC του IEEE 802.11 για να υποστηρίξει τις λειτουργίες του WAVE.

➤ **IEEE P1609.11 – Πρότυπο για ανταλλαγή δεδομένων πάνω από τον αέρα για συστήματα έξυπνων μεταφορών (ITS)**

Το πρότυπο αυτό καθορίζει τις υπηρεσίες και τις μορφές των μηνυμάτων ασφαλείας που είναι απαραίτητες για την υποστήριξη των ασφαλών ηλεκτρονικών πληρωμών.

Επιπρόσθετα, τα πρότυπα της οικογένειας IEEE 1609 βασίζονται στο πρότυπο IEEE P802.11p [40]. Το προτεινόμενο αυτό πρότυπο καθορίζει τις επεκτάσεις που πρέπει να γίνουν στο IEEE 802.11 για να παρέχεται ασύρματη δικτύωση σε αυτοκινητιστικό περιβάλλον.

▪ CALM

Το CALM παρέχει συνεχή επικοινωνία μεταξύ ενός αυτοκινήτου και μονάδας στην άκρη του δρόμου χρησιμοποιώντας μια ποικιλία μέσων επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των κυψελωτών επικοινωνιών, των συχνοτήτων 5 GHz και 63 GHz καθώς και υπέρυθρων συνδέσεων. Το CALM θα προσφέρει μια σειρά εφαρμογών, που αφορούν στην ασφάλεια των αυτοκινήτων και των πληροφοριών, καθώς και στην ψυχαγωγία για τον οδηγό και τους επιβάτες.

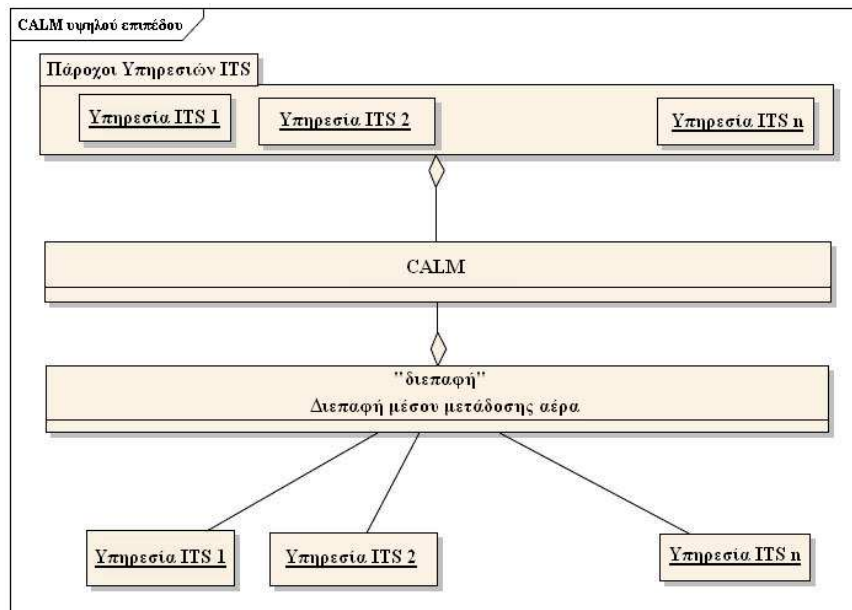
Ο σκοπός του CALM είναι να παρέχει ένα τυποποιημένο σύνολο πρωτοκόλλων διεπαφής του αέρα και παραμέτρων για τις μεσαίας και μεγάλης εμβέλειας, υψηλής ταχύτητας ITS επικοινωνίες, χρησιμοποιώντας ένα ή περισσότερα από τα διάφορα μέσα μετάδοσης. Αυτό μπορεί να γίνει με τη βοήθεια πρωτοκόλλων πολλαπλών σημείων και πρωτοκόλλων δικτύωσης μέσα σε κάθε μέσο μετάδοσης, καθώς και με πρωτόκολλα ανώτερου στρώματος για να καταστεί δυνατή η μεταφορά μεταξύ των μέσων μετάδοσης.

Η υπηρεσία αυτή περιλαμβάνει τους ακόλουθους τύπους επικοινωνίας:

- *Αυτοκίνητο-Υποδομή*: Οι παράμετροι επικοινωνίας πολλαπλών σημείων διαπραγματεύονται αυτόματα και η επικείμενη επικοινωνία μπορεί να αρχικοποιηθεί είτε από τη υποδομή είτε από το αυτοκίνητο.
- *Υποδομή-Υποδομή*: Το σύστημα επικοινωνίας μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να συνδέσει σταθερά σημεία όπου η παραδοσιακή καλωδίωση είναι ανεπιθύμητη.
- *Αυτοκίνητο-Αυτοκίνητο*: Ένα δίκτυο ομότιμων γρήγορης απόκρισης με τη δυνατότητα να μεταφέρει δεδομένα που σχετίζονται με ασφάλεια, όπως αποφυγή σύγκρουσης, και άλλες υπηρεσίες αυτοκινήτου-με-αυτοκίνητο, όπως ad hoc δίκτυα που συνδέουν πολλαπλά αυτοκίνητα.

Στο υψηλότερο επίπεδο αφαίρεσης μπορούμε να φανταστούμε ότι, από τη μία πλευρά, έχουμε πολλαπλές υπηρεσίες που ενδεχομένως λειτουργούν ταυτόχρονα και απαιτούν υπηρεσίες επικοινωνιών. Από την άλλη πλευρά έχουμε τη δυνατότητα για πολλαπλά μέσα επικοινωνίας στο αυτοκίνητο που προσπαθούν να χειριστούν τη συναλλαγή. Στο ενδιάμεσο το CALM διαχειρίζεται τη συνεχή επικοινωνία χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα μέσα, για να ικανοποιήσει τις ανάγκες μιας ή περισσότερων εφαρμογών. Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε ότι το αυτοκίνητο μπορεί να διατηρεί πολλαπλές ταυτόχρονες συνδέσεις. Η Εικόνα 12 παρέχει ένα σχηματικό που αφορά τα λειτουργία του CALM στο υψηλότερο επίπεδο αφαίρεσης.

Επίσης είναι σημαντικό να κατανοήσουμε ότι οι προδιαγραφές και τα πρότυπα του CALM δεν αποτελούν ένα φυσικό κομμάτι του εξοπλισμού. Ενώ το CALM μπορεί πράγματι να λειτουργεί μέσα από ένα "κουτί" σχεδιασμένο για την επίτευξη των καθηκόντων του, το CALM είναι στην πραγματικότητα ένα σχετικό σύνολο πρωτοκόλλων, διαδικασιών και διαχειριστικών ενεργειών. Η υλοποίηση είναι συνάρτηση της εμπορικής απόφασης. Παρόλο που μπορεί να εμφανιστεί στο αυτοκίνητο με τη μορφή ενός κουτιού, είναι εξίσου πιθανό να ενσωματωθεί σε μία από τις λειτουργίες προγραμματισμού μέσα στο αυτοκίνητο.



Εικόνα 12: Η ιδέα του CALM στο υψηλότερο επίπεδο αφαίρεσης

Ευρωπαϊκά έργα

- **SAFESPOT**

Το SAFESPOT είναι ένα ολοκληρωμένο ερευνητικό πρόγραμμα το οποίο συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και τρέχει από το 2006 έως το 2010. Το SAFESPOT αναπτύσσει έναν «Βοηθό Περιθωρίου Ασφαλείας» (Safety Margin Assistant) με το συνδυασμό επικοινωνιών αυτοκινήτου-με-αυτοκίνητο και αυτοκινήτου-με-υποδομή. Ο Βοηθός Περιθωρίου Ασφαλείας όχι μόνο ανιχνεύει εκ των προτέρων πιθανές επικίνδυνες καταστάσεις, αλλά επιπλέον επεκτείνει την επίγνωση του οδηγού για το γύρω περιβάλλον στο χώρο και στο χρόνο. Βασικές τεχνολογίες που αναπτύσσονται στο SAFESPOT είναι η δυναμική ad hoc δικτύωση, η ακριβής και σε πραγματικό χρόνο σχετική εύρεση θέσης, οι δυναμικοί τοπικοί χάρτες κυκλοφορίας καθώς και τεχνολογίες αισθητήρων στο αυτοκίνητο και στους σταθμούς βάσης.

Μια τεχνολογική πρόκληση που αποτελεί κλειδί στο SAFESPOT είναι η ανάπτυξη μιας πλατφόρμας επικοινωνίας που καθιστά δυνατή την αξιόπιστη, γρήγορη, ασφαλή και αποδοτική επικοινωνία αυτοκινήτου-με-x, όπου x μπορεί να σημαίνει αυτοκίνητο ή υποδομή. Στο SAFESPOT η επικοινωνία βασίζεται κυρίως στην IEEE 802.11 ασύρματη τεχνολογία (τόσο για την επικοινωνία μεταξύ των αυτοκινήτων όσο και για την επικοινωνία αυτοκινήτου με σταθμό βάσης). Το SAFESPOT συνεργάζεται με το C2C-CC και μερικώς βασίζεται στα αποτελέσματα του έργου NoW (Network on Wheels) [41,42]. Για διαφορετικού τύπου επικοινωνίες, εκτός από το 802.11 της IEEE, το SAFESPOT συνεργάζεται με το CVIS για τον καθορισμό μιας κοινής αρχιτεκτονικής επικοινωνίας που είναι σε συμφωνία με το πρότυπο ISO CALM. Μια άλλη τεχνολογική πρόκληση του SAFESPOT είναι να αναπτύξει ένα πολύ ακριβές και αξιόπιστο σύστημα σχετικής θέσης, με σκοπό να καταστήσει ικανές αναπτυγμένες συνεργατικές συμπεριφορές. Μια πληθώρα από τεχνικές λαμβάνονται υπόψη συμπεριλαμβάνοντας τεχνικές εύρεσης θέσης που βασίζονται στα GNSS (Global Navigation Satellite System), όπως είναι το GPS και το Galileo, εύρεση θέσης βασισμένη στις

επικοινωνίες, όπως UWB (Ultra wideband), WLAN (Wireless Local Area Network) και GSM (Global System for Mobile communications), εύρεση θέσης που βασίζεται στην εικόνα, καθώς και χρήση σαρωτών λέιζερ για εύρεση φυσικών ορίων/σημείων, καθώς και συνδυαστική χρήση δύο ή περισσότερων τεχνολογιών.

Για το χειρισμό των ποικίλων στατικών και δυναμικών πληροφοριών, στο SAFESPOT αναπτύχθηκε η ιδέα του Τοπικού Δυναμικού Χάρτη (Local Dynamic Map - LDM) [43]. Ο LDM είναι μια δυναμική αναπαράσταση πολλαπλών στρωμάτων του περιβάλλοντος γύρω από το αυτοκίνητο ή από μία μονάδα στην πλευρά του δρόμου, όπου όλες οι πληροφορίες που προέρχονται από τους αισθητήρες και την επικοινωνία συλλέγονται ύστερα από τις διαδικασίες σύντηξης. Ο LDM αποτελείται από τέσσερα διαφορετικά στρώματα: ένα στατικό χάρτη, παρόμοιο με αυτόν που χρησιμοποιούν τα συστήματα πλοήγησης σήμερα, ένα στρώμα από φυσικά όρια/σημεία που χρησιμοποιούνται σαν αναφορά, ένα προσωρινό στρώμα αντικειμένων, στο οποίο ατυχήματα ή άλλες καταστάσεις σημειώνονται και τέλος ένα στρώμα το οποίο περιλαμβάνει τα δυναμικά αντικείμενα, με άλλα λόγια, τα αυτοκίνητα. Οι εφαρμογές έχουν πρόσβαση στον LDM σαν πηγή πληροφοριών που πρέπει να διανεμηθούν στο δίκτυο καθώς και πληροφοριών που πρέπει να παρασχεθούν στον οδηγό.

Με βάση την πλατφόρμα επικοινωνίας που αναπτύχθηκε, το SAFESPOT παρέχει αυτοκίνητα με βελτιωμένη εμβέλεια, ποιότητα και αξιοπιστία στις πληροφορίες που σχετίζονται με ασφάλεια. Επιπλέον, το SAFESPOT παρέχει αυτοκίνητα με εντεταμένη συνεργατική συνείδηση της κατάστασης. Το γεγονός αυτό δίνει στους οδηγούς και στα εγκατεστημένα συστήματα στο αυτοκίνητο περισσότερο χώρο και χρόνο ώστε να αντιδράσουν με ασφάλεια και με κατάλληλο τρόπο σε πιθανούς κινδύνους. Παραδείγματα εφαρμογών που σχετίζονται με ασφάλεια και αναπτύσσονται από το SAFESPOT είναι ασφαλείς ελιγμοί για αλλαγή λωρίδας, πρόληψη αποχώρησης από το δρόμο, συνεργατική πραγματοποίηση ελιγμών, συνεργατική ασφάλεια σε τούνελ, προειδοποίηση για κινδύνους και συμβάντα, ασφαλείς αστικές και μη αστικές διασταυρώσεις.

▪ CVIS

Το πρόγραμμα Co-operative Vehicle-Infrastructure Systems(CVIS) είναι ένα ερευνητικό έργο το οποίο συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και τρέχει από το 2006 έως το 2010. Ο υψηλού επιπέδου στόχος του CVIS είναι να καταστήσει δυνατή τη συνεχή επικοινωνία και τις συνεργατικές υπηρεσίες μεταξύ αυτοκινήτων και υποδομής για να αυξήσει την οδική ασφάλεια και την αποδοτικότητα της κυκλοφορίας. Το CVIS συμπληρώνει τα έργα SAFESPOT (από την πλευρά της αυτοκίνητοβιομηχανίας) και COOPERS (από την πλευρά του διαχειριστή του δρόμου). Το CVIS παρέχει τις ακόλουθες τέσσερις υπηρεσίες:

1. Το COMM παρέχει μία αρχιτεκτονική του δικτύου η οποία επιτρέπει διαφανή και συνεχή επικοινωνία αυτοκινήτου-με-x (όπου x μπορεί να είναι άλλο αυτοκίνητο ή σταθμός βάσης).

2. Το POMA παρέχει τεχνικές εύρεσης θέσης, υπηρεσίες χαρτών, και υπηρεσίες αναφοράς τοποθεσίας.
3. Το COMO παρέχει συνεργατικές υπηρεσίες παρακολούθησης. Επιπλέον επιτρέπει τόσο τοπική όσο και κεντρική σύντηξη δεδομένων.
4. Το FOAM παρέχει ένα ανοιχτό, από άκρη σε άκρη, πλαίσιο αναφοράς για συστήματα εντός του αυτοκινήτου, μονάδες στην πλευρά του δρόμου και συστήματα υποστήριξης ολόκληρου του δικτύου. Το πλαίσιο αυτό καθιστά δυνατή τη σύνδεση μεταξύ αυτοκινήτων και υποδομής.

Το CVIS προσπαθεί να αναπτύξει μια ενιαία αρχιτεκτονική δικτύου για ποικίλες τεχνολογίες σύνδεσης που χρειάζονται για επικοινωνία αυτοκινήτου-με-αυτοκίνητο και επικοινωνία αυτοκινήτου-με-σταθμό βάσης. Σε αντίθεση με άλλα έργα που εστιάζουν στην IEEE 802.11 ασύρματη τεχνολογία, το CVIS λαμβάνει υπόψη μια ευρεία γκάμα τεχνολογιών επικοινωνίας, όπως οι υπέρυθρες επικοινωνίες, οι κυψελωτές τεχνολογίες (GPRS ή UMTS), οι μικρής εμβέλειας μικροκυματικές επικοινωνίες (DSRC) και οι τοπικές ασύρματες επικοινωνίες (IEEE 802.11 και IEEE 1609). Η πρόσβαση σε αυτές τις διεπαφές βασίζεται στο πρότυπο ISO TC 204 του CALM [33] και πιο συγκεκριμένα στα τυποποιημένα σημεία πρόσβασης υπηρεσίας του CALM. Στο CVIS το IPv6 παίζει σημαντικό ρόλο για τη διασφάλιση συνεχούς και διάφανης επικοινωνίας στην κορυφή διαφορετικών τεχνολογιών σύνδεσης, αλλά υποστηρίζει και επικοινωνία που δεν χρειάζεται IP για γρήγορες σχετιζόμενες με ασφάλεια εφαρμογές. Τέλος το CVIS υποστηρίζει την κινητικότητα δικτύου (Network Mobility - NEMO) [44].

▪ COOPERS

Το COOPERS είναι ένα ερευνητικό έργο το οποίο συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και τρέχει από το 2006 έως το 2010. Το έργο ερευνά νέες υπηρεσίες που σχετίζονται με ασφάλεια χρησιμοποιώντας συνεχή ασύρματη επικοινωνία δύο κατευθύνσεων μεταξύ αυτοκινήτων και υποδομής από την πλευρά του διαχειριστή της κυκλοφορίας. Στο COOPERS χρησιμοποιείται διπλής κατεύθυνσης επικοινωνία, αυτοκινήτου-με-υποδομή, για την παροχή χωρικών πληροφοριών που σχετίζονται με την ασφάλεια σε πραγματικό χρόνο καθώς και πληροφορίες σχετικές με την κατάσταση της υποδομής, όπως το μποτιλιάρισμα. Το έργο επίσης προσπαθεί να βελτιώσει την αξιοπιστία και την ακρίβεια των πληροφοριών που παρέχονται από τους φορείς εκμετάλλευσης του οδικού δικτύου προς τους οδηγούς. Το COOPERS παρέχει διαφορετικές υπηρεσίες πληροφοριών: προειδοποίηση ατυχήματος, προειδοποίηση για τις καιρικές συνθήκες, ενημέρωση για έργα στο οδικό δίκτυο, πληροφορίες χρησιμοποίησης της λωρίδας, πληροφόρηση για όριο ταχύτητας, προειδοποίηση για οδική συμφόρηση και πλοήγηση διαδρομής. Το έργο ακολουθεί μια προσέγγιση τριών βημάτων:

1. Προσπαθεί να βελτιώσει τους αισθητήρες υποδομής του οδικού δικτύου και τις εφαρμογές ελέγχου της κυκλοφορίας με στόχο να πετύχει ακριβείς, επίκαιρες και βασισμένες στην κατάσταση πληροφορίες κυκλοφορίας.

2. Αναπτύσσει μια αρχιτεκτονική επικοινωνίας η οποία ικανοποιεί τις απαιτήσεις της επικοινωνίας αυτοκινήτου-με-υποδομή σε όρους αξιοπιστίας, σταθερότητας και ικανότητας χρησιμοποίησης σε πραγματικό χρόνο. Χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός διαφορετικών τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας, π.χ. ψηφιακή ακουστική εκπομπή (Digital Audio Broadcast - DAB), GPRS, UMTS, ασύρματο τοπικό δίκτυο (IEEE 802.11 και IEEE 1609), υπέρυθρες και μικροκυματικές τεχνολογίες (DSRC).
3. Αναπτύσσει και δοκιμάζει τα αποτελέσματα σε σημαντικά τμήματα ευρωπαϊκών αυτοκινητοδρόμων στο Βέλγιο, στην Ολλανδία, στη Γερμανία, στην Αυστρία, στην Ιταλία και στη Γαλλία. Τα αποτελέσματα των δοκιμών θα χρησιμοποιηθούν για μελλοντική ανάπτυξη του συστήματος σε μεγάλη κλίμακα.

1.3.3 Δρομολόγηση

Η δρομολόγηση είναι η διαδικασία της εύρεσης μιας διαδρομής από έναν κόμβο πηγή σε έναν κόμβο προορισμό. Εφόσον κάθε κόμβος έχει περιορισμένη ακτίνα μετάδοσης, τα μηνύματα συχνά πρέπει να προωθηθούν από άλλους κόμβους σε ένα VANET. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για VANETs [45,46] μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: δρομολόγηση με βάση την τοπολογία και δρομολόγηση με βάση την θέση. Τα πρώτα χρησιμοποιούν πληροφορίες σχετικές με τους υπάρχοντες συνδέσμους του δικτύου για να προχωρήσουν στην προώθηση πακέτων. Στα δεύτερα οι αποφάσεις προώθησης στηρίζονται στη θέση των κόμβων. Επίσης τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που βασίζονται στη θέση, μπορούν περαιτέρω να διακριθούν σε προ-ενεργητικά (proactive) και αντιδραστικά (reactive).

Οι προ-ενεργητικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν κλασικές στρατηγικές δρομολόγησης όπως είναι η δρομολόγηση διανύσματος-απόστασης ή η δρομολόγηση κατάστασης-συνδέσμου. Οι προ-ενεργητικοί αλγόριθμοι διατηρούν πληροφορίες δρομολόγησης σχετικά με τα διαθέσιμα μονοπάτια στο δίκτυο ακόμα και αν αυτά τα μονοπάτια δεν χρησιμοποιούνται προσωρινά. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι πως η διατήρηση των αχρησιμοποίητων μονοπατιών καταλαμβάνει ένα σημαντικό μέρος του διαθέσιμου εύρους ζώνης αν η τοπολογία του δικτύου αλλάζει συχνά.

Σαν απάντηση στο πρόβλημα της διατήρησης των μονοπατιών από τα προ-ενεργητικά πρωτόκολλα, δημιουργήθηκαν τα αντιδραστικά πρωτόκολλα δρομολόγησης. Τα αντιδραστικά πρωτόκολλα διατηρούν μόνο τις διαδρομές που είναι σε χρήση, μειώνοντας έτσι το φορτίο στο δίκτυο όταν μόνο ένα μικρό υποσύνολο των διαθέσιμων διαδρομών χρησιμοποιούνται.

Στη δρομολόγηση που βασίζεται στη θέση, οι αποφάσεις προώθησης βασίζονται στη θέση του κόμβου που προωθεί το μήνυμα ανάλογα με τη θέση των κόμβων πηγής και προορισμού. Σε αντίθεση με τις καθαρά ad hoc προσεγγίσεις δρομολόγησης που βασίζονται στην τοπολογία, εδώ δεν χρειάζεται η εγκατάσταση ή η διατήρηση μιας διαδρομής καθώς τα πακέτα προωθούνται απευθείας. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης με βάση τη θέση αποτελούνται από υπηρεσίες θέσης και γεωγραφική προώθηση.

Η γεωγραφική προώθηση εκμεταλλεύεται μια τοπολογική υπόθεση που δουλεύει καλά για ασύρματα ad hoc δίκτυα: κόμβοι οι οποίοι είναι φυσικά κοντά είναι πιθανό να είναι επίσης κοντά στην τοπολογία του δικτύου. Κάθε κόμβος γνωρίζει τη δική του γεωγραφική θέση χρησιμοποιώντας μηχανισμούς όπως ένα GPS και περιοδικά ανακοινώνει την παρουσία του, τη θέση του και την ταχύτητά του στους γείτονές του. Με αυτόν τον τρόπο κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα με τα αναγνωριστικά και τις γεωγραφικές θέσεις των προσωρινών γειτόνων του. Όταν κάποιος κόμβος χρειάζεται να προωθήσει ένα πακέτο, περιλαμβάνει το αναγνωριστικό του κόμβου-προορισμού καθώς επίσης και την γεωγραφική του θέση στην επικεφαλίδα του πακέτου. Κάθε κόμβος κατά μήκος του μονοπατιού προώθησης συμβουλεύεται τον πίνακα των γειτόνων του και προωθεί το πακέτο προς τον γείτονα που είναι πιο κοντά στον προορισμό σαν φυσική θέση, μέχρι να φτάσει στον τελικό προορισμό.

Παρόλο που η γεωγραφική προώθηση δουλεύει καλά για δίκτυα όπου οι κόμβοι είναι ομοιόμορφα καταναμημένοι, ίσως δεν μπορεί να βρει μια διαδρομή προς τον προορισμό ενός πακέτου όταν το πακέτο πρέπει να ταξιδέψει γύρω από μια «τρύπα» στην τοπολογία – δηλαδή, όταν ένας ενδιαμέσος κόμβος προώθησης δεν έχει γείτονες οι οποίοι να είναι πιο κοντά απ' ό,τι ο ίδιος στον προορισμό του πακέτου.

Παραδείγματα αλγορίθμων δρομολόγησης με βάση την τοπολογία

- **Fisheye State Routing** [47,48] είναι ένας αποδοτικός αλγόριθμος δρομολόγησης με βάση την κατάσταση του συνδέσμου ο οποίος διατηρεί έναν χάρτη της τοπολογίας σε κάθε κόμβο και διαδίδει ενημερώσεις για την κατάσταση των συνδέσμων μόνο στους άμεσους γείτονες και όχι σε όλο το δίκτυο. Επιπλέον, πληροφορίες για την κατάσταση των συνδέσμων εκπέμπονται σε διαφορετικές συχνότητες για διαφορετικούς κόμβους ανάλογα με την απόσταση αναμετάδοσης προς τον τρέχον κόμβο. Οι κόμβοι που είναι πιο μακριά εκπέμπουν σε χαμηλότερες συχνότητες από άλλους που είναι πιο κοντά. Η μείωση της επιβάρυνσης κατά την εκπομπή έχει σαν συνέπεια την όχι τόσο μεγάλη ακρίβεια στη δρομολόγηση. Ωστόσο, η ανακρίβεια διορθώνεται καθώς τα πακέτα πλησιάζουν προοδευτικά προς τον προορισμό.
- **Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV)** [49] είναι αλγόριθμος δρομολόγησης στον οποίο με την λήψη ενός ερωτήματος εκπομπής οι κόμβοι καταγράφουν τη διεύθυνση του κόμβου που στέλνει το ερώτημα στον πίνακα δρομολόγησης τους. Η διαδικασία αυτή της καταγραφής της προηγούμενης αναμετάδοσης (hop) λέγεται *προς τα πίσω μάθηση*. Με το που φτάσει ένα πακέτο στον προορισμό του, ένα πακέτο απάντησης στέλνεται μέσω του πλήρους μονοπατιού που ανακλήθηκε από την διαδικασία της προς τα πίσω μάθησης προς την πηγή. Σε κάθε στάση του μονοπατιού, ο κόμβος θα πρέπει να καταγράψει το προηγούμενο hop, δημιουργώντας έτσι το προς τα μπρος μονοπάτι από την πηγή. Το ερώτημα μαζί με την αποστολή της απάντησης δημιουργούν ένα πλήρες μονοπάτι διπλής κατεύθυνσης (αποστολής-λήψης). Μετά από την εγκατάσταση του μονοπατιού, το μονοπάτι διατηρείται όσο η πηγή το χρησιμοποιεί. Μια αποτυχία σε κάποια σύνδεση θα αναφερθεί αναδρομικά στην πηγή και με τη σειρά της θα πυροδοτήσει μια άλλη διαδικασία ερωτήματος-απόκρισης για να βρεθεί η νέα διαδρομή.

- **Dynamic Source Routing (DSR)** [50] είναι αλγόριθμος που χρησιμοποιεί *δρομολόγηση πηγής*, δηλαδή, η πηγή υποδεικνύει σε ένα πακέτο δεδομένων την αλληλουχία των ενδιάμεσων κόμβων στο μονοπάτι της δρομολόγησης. Στον DSR, το πακέτο ερωτήματος αντιγράφει στην επικεφαλίδα του τα IDs των ενδιάμεσων κόμβων που έχει διασχίσει. Ο προορισμός έπειτα ανακτά ολόκληρο το μονοπάτι από το πακέτο ερωτήματος και το χρησιμοποιεί για να αποκριθεί στην πηγή. Σαν αποτέλεσμα, η πηγή μπορεί να εγκαταστήσει ένα μονοπάτι προς τον προορισμό. Αν επιτραπεί στον προορισμό να στείλει πολλαπλές απαντήσεις διαδρομών, ο κόμβος πηγής ίσως λάβει και αποθηκεύσει πολλαπλές διαδρομές από τον προορισμό. Μια εναλλακτική διαδρομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν κάποιος σύνδεσμος στο τρέχον μονοπάτι σπάσει. Σε ένα δίκτυο με χαμηλή κινητικότητα αυτό έχει πλεονέκτημα απέναντι στον AODV εφόσον η εναλλακτική διαδρομή μπορεί να δοκιμαστεί πριν ο DSR αρχίσει άλλο ερώτημα για ανακάλυψη της διαδρομής. Υπάρχουν δύο σημαντικές διαφορές ανάμεσα στον AODV και τον DSR. Η πρώτη είναι ότι στον AODV τα πακέτα δεδομένων μεταφέρουν την διεύθυνση του προορισμού, ενώ στον DSR τα πακέτα δεδομένων μεταφέρουν όλες τις πληροφορίες δρομολόγησης. Αυτό σημαίνει πως ο DSR έχει πιθανότατα μεγαλύτερη επιβάρυνση δρομολόγησης απ' ότι ο AODV. Επιπλέον, καθώς η διάμετρος του δικτύου αυξάνει, η επιβάρυνση στο πακέτο δεδομένων θα συνεχίσει να αυξάνεται. Η δεύτερη διαφορά είναι ότι στον AODV τα πακέτα απάντησης διαδρομής μεταφέρουν την διεύθυνση του προορισμού και τον αριθμό αλληλουχίας, ενώ στον DSR τα πακέτα απάντησης διαδρομής μεταφέρουν τη διεύθυνση του κάθε κόμβου κατά μήκος της διαδρομής.

Παραδείγματα αλγορίθμων δρομολόγησης με βάση την θέση

- **Connectivity-Aware Routing (CAR)** [51] είναι ένας αλγόριθμος δρομολόγησης ο οποίος προήλθε από τη δουλειά του Preferred Group Broadcast (PGB) με σκοπό τη μείωση της εκπομπής από την ανακάλυψη της διαδρομής του AODV και του Advanced Greedy Forwarding (AGF) που λαμβάνει υπόψη την κινητικότητα των κόμβων. Το CAR χρησιμοποιεί την ανακάλυψη της διαδρομής του AODV για να βρει διαδρομές με μειωμένη εκπομπή από το PGB. Ωστόσο, οι κόμβοι που σχηματίζουν τη διαδρομή δεν καταγράφουν ούτε τον προηγούμενο κόμβο τους από την προς τα πίσω μάθηση ούτε τον προηγούμενο κόμβο τους που προωθεί το πακέτο απόκρισης διαδρομής από τον προορισμό. Μόνο *σημεία άγκυρες (anchor points)*, τα οποία είναι κόμβοι κοντά σε μία διασταύρωση ή σε μια καμπύλη του δρόμου, καταγράφονται στο πακέτο ανακάλυψης διαδρομής. Ένας κόμβος καθορίζει τον ίδιο σαν σημείο άγκυρας αν το διάνυσμα της ταχύτητάς του δεν είναι παράλληλο στο διάνυσμα της ταχύτητας του προηγούμενου κόμβου στο πακέτο. Ο προορισμός ίσως λάβει πολλαπλά πακέτα ανακάλυψης διαδρομής. Αν συμβεί αυτό επιλέγει το μονοπάτι που παρέχει την καλύτερη συνδεσιμότητα και τις μικρότερες καθυστερήσεις.
- **Geographic Source Routing (GSR)** [52] βασίζεται στην διαθεσιμότητα ενός χάρτη και υπολογίζει το συντομότερο Dijkstra μονοπάτι [60] στον επικαλυπτόμενο γράφο όπου οι κορυφές είναι οι κόμβοι διασταύρωσης και οι ακμές είναι οι δρόμοι που συνδέουν αυτές τις κορυφές. Η αλληλουχία των

διασταυρώσεων εγκαθιστά τη διαδρομή προς τον προορισμό. Έπειτα τα πακέτα προωθούνται «άπληστα» (greedily) μεταξύ των διασταυρώσεων. Ο GSR δεν λαμβάνει υπόψη τη συνδεσιμότητα μεταξύ δύο διασταυρώσεων, επομένως η διαδρομή ίσως να μην είναι πλήρως συνδεδεμένη. Η ανάκτηση σε περίπτωση που συμβεί μια τέτοια κατάσταση γίνεται με άπληστη προώθηση. Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ GSR και CAR είναι ότι ο CAR δεν χρησιμοποιεί χάρτη και χρησιμοποιεί προ-ενεργητική ανακάλυψη των σημείων ακύρων που υποδεικνύουν μια στροφή σε μια διασταύρωση.

- ο **Anchor-Based Street and Traffic Aware Routing (A-STAR)** [53] είναι πανομοιότυπος με τον GSR στο ότι τα πακέτα δρομολογούνται μέσω των σημείων ακύρων της επικάλυψης. Ωστόσο, ο A-STAR έχει επίγνωση της κυκλοφορίας: η κυκλοφορία στο δρόμο καθορίζει αν τα σημεία άγκυρας του δρόμου θα περιληφθούν στο συντομότερο μονοπάτι. Ο A-STAR δρομολογεί με βάση δύο ειδών επικαλυπτόμενους χάρτες: ένα χάρτη που λειτουργεί στατιστικά και έναν χάρτη που λειτουργεί δυναμικά. Ο χάρτης που λειτουργεί στατιστικά είναι ένα γράφος που απεικονίζει διαδρομές λεωφορείων που συνήθως υπονοούν σταθερή ποσότητα κυκλοφορίας. Τα μονοπάτια Dijkstra που υπολογίζονται πάνω στον στατιστικό αυτό χάρτη είναι εν γένει συνδεδεμένα εξαιτίας της επιπλέον γνώσης. Ο χάρτης που λειτουργεί δυναμικά είναι ένας χάρτης ο οποίος δημιουργείται με βάση τις συνθήκες της κυκλοφορίας στους δρόμους σε πραγματικό χρόνο. Οι σταθμοί βάσης στην πλευρά του δρόμου μπορούν να παρακολουθούν την κατάσταση της κυκλοφορίας στην πόλη και να διαδώσουν αυτή την πληροφορία σε κάθε αυτοκίνητο. Επομένως, η διαφορά μεταξύ ενός χάρτη που λειτουργεί στατιστικά με έναν χάρτη που λειτουργεί δυναμικά είναι η ακρίβεια της κυκλοφορίας στους δρόμους. Ενώ ένας χάρτης που λειτουργεί στατιστικά βασίζεται στις διαδρομές των λεωφορείων που τυπικά έχουν υψηλό όγκο κυκλοφορίας, ένας χάρτης που λειτουργεί δυναμικά βασίζεται στην παρακολούθηση της κυκλοφορίας που γίνεται δυναμικά από τους σταθμούς βάσης στην άκρη του δρόμου.

1.3.4 Ασφάλεια και προστασία προσωπικών δεδομένων

Η ασφάλεια στις επικοινωνίες αυτοκινήτου-με-αυτοκίνητο και αυτοκινήτου-με-υποδομή είναι απαραίτητο προαπαιτούμενο για την μελλοντική ανάπτυξη ενός δικτύου αυτοκινήτων και τη χρήση του στον πραγματικό κόσμο. Το σύστημα θα πρέπει να εξασφαλίσει ότι η μετάδοση προέρχεται από έμπιστη πηγή και ότι η μετάδοση δεν έχει παραποιηθεί. Για παράδειγμα, σε μια εφαρμογή προειδοποίησης παραβίασης φωτεινού σηματοδότη, το σύστημα εντός του αυτοκινήτου θα χρησιμοποιήσει πληροφορίες που προέρχονται από την υποδομή που είναι εγκατεστημένη στους φωτεινούς σηματοδότες για να καθορίσει αν μια προειδοποίηση πρέπει να δοθεί στον οδηγό. Μία λανθασμένη μετάδοση από μία μη έγκυρη, εκτεθειμένη μονάδα που δυσλειτουργεί, ίσως θέσει σε κίνδυνο την ασφάλεια του αυτοκινήτου καθώς και την ασφάλεια των υπολοίπων στην γύρω περιοχή. Παρομοίως, διακυβεύεται η μελλοντική υλοποίηση των εφαρμογών ασφαλείας (όπως η εφαρμογή προειδοποίησης προσέγγισης αυτοκινήτου έκτακτης ανάγκης)

χωρίς την εξασφάλιση ότι οι μεταδόσεις προέρχονται από έγκυρη πηγή (πραγματικό αυτοκίνητο έκτακτης ανάγκης στην περίπτωση μας).

Η προστασία προσωπικών δεδομένων και η ανωνυμία είναι σημαντικά ζητήματα τα οποία πρέπει να εξεταστούν. Οι εφαρμογές ασφαλείας που χρησιμοποιούν επικοινωνία εκπέμπουν μηνύματα για την τρέχουσα θέση, την ταχύτητα και την κατεύθυνση ενός αυτοκινήτου. Είναι επιθυμητό οι χρήστες να έχουν προστασία των προσωπικών τους δεδομένων με σκοπό να αποτραπεί η αποκάλυψη της πλήρους ταυτότητάς τους. Αυτό είναι πολύ βασικό από τη στιγμή που οι καταναλωτές φοβούνται ότι ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία μηχανισμών εντοπισμού οι οποίοι θα επιτρέψουν την παρενόχληση, την αυτόματη έκδοση κλήσεων υπερβολικής ταχύτητας, ή αλλιώς θα λειτουργήσουν με ανεπιθύμητο τρόπο για αυτούς.

Δυστυχώς, μπορεί να γίνει κατάχρηση της άνευ όρων ανωνυμίας, όπως για παράδειγμα η αποστολή ψεύτικων πληροφοριών και η αποστολή ανεπιθύμητης πληροφορίας. Η απόδοση ευθύνης (accountability) αφορά την ικανότητα ανάθεσης πράξεων στην οντότητα που προκάλεσε αυτές τις πράξεις. Ένα σύστημα ευθύνης λειτουργεί αποτρεπτικά για λάθος συμπεριφορά. Οι χρήστες γνωρίζουν πως θα υπάρχουν συνέπειες για άλλους αν γίνει κατάχρηση των δεδομένων τους. Η πρόκληση είναι η εξασφάλιση της ανωνυμίας και απόδοση της ευθύνης ταυτόχρονα, καθώς εμφανίζονται να είναι συγκρουόμενες.

Σε αυτή την ενότητα, αρχικά αναφέρονται οι πιθανές επιθέσεις και οι ανάγκες ασφαλείας και προστασίας προσωπικών δεδομένων, ενώ στη συνέχεια αναφέρονται οι προσεγγίσεις μετριασμού της απειλής στα δίκτυα αυτοκινήτων. Για περισσότερες λεπτομέρειες ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να αναφερθεί στα [54-57], καθώς η ασφάλεια και η προστασία των προσωπικών δεδομένων δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας διατριβής.

Πιθανές επιθέσεις

Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των ανεξάρτητων μελών του δικτύου και την παρουσία του ανθρώπινου παράγοντα, είναι πολύ πιθανό στα μελλοντικά δίκτυα αυτοκινήτων να εμφανιστούν ανάρμοστες συμπεριφορές.

Οι πιθανές επιθέσεις στα δίκτυα αυτοκινήτων περιλαμβάνουν τα εξής:

- **Ψευδείς πληροφορίες:** οι επιτιθέμενοι στέλνουν ανακριβείς πληροφορίες στο δίκτυο για να επηρεάσουν τη συμπεριφορά των υπόλοιπων οδηγών. Για παράδειγμα, κάποιος με δόλο μπορεί να αναφέρει ψευδείς πληροφορίες για άλλα μέρη του δικτύου των αυτοκινήτων (π.χ. μη υπάρχοντα μποτιλιαρίσματα ή ατυχήματα) για να απομακρύνει την κυκλοφορία από ένα δεδομένο δρόμο για προσωπική χρήση.
- **Πλαστοπροσωπία:** οι επιτιθέμενοι προσποιούνται πως είναι άλλα αυτοκίνητα χρησιμοποιώντας ψεύτικες ταυτότητες. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ένα αυτοκίνητο μπορεί να προσποιηθεί πως είναι της αστυνομίας ή της πυροσβεστικής για να εκδώσει προειδοποίηση προσέγγισης αυτοκινήτου έκτακτης ανάγκης με σκοπό να αποφύγει την κίνηση.

- **Άρνηση εξυπηρέτησης:** οι επιτιθέμενοι ίσως θελήσουν να καταστρέψουν το δίκτυο των αυτοκινήτων ή να προκαλέσουν κάποιο ατύχημα. Παραδείγματα τέτοιων επιθέσεων περιλαμβάνουν το μπλοκάρισμα του διαύλου καθώς και επιθετική εισροή εικονικών μηνυμάτων.
- **Παρακολούθηση:** η τεχνολογία των επικοινωνιών για ασφάλεια των αυτοκινήτων ίσως χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση των οδηγών που χρησιμοποιούν τους δημόσιους δρόμους για τις καθημερινές τους δραστηριότητες. Πιθανές καταχρήσεις των συστημάτων εντοπισμού αυτοκινήτων είναι η άσκηση βίας, η παρακολούθηση με σκοπό την καταδίωξη, η τρομοκρατία, η επιβολή του εντοπισμού από το νόμο, η αυτόματη έκδοση κλήσεων για υπερβολική ταχύτητα ή η επιβολή προστίμου από τις εταιρείες ενοικίασης αυτοκινήτων για απομάκρυνση από την πόλη.
- **Αναπαραγωγή νόμιμων μηνυμάτων:** ένα νόμιμο μήνυμα μπορεί να υποκλαπεί και να αναπαραχθεί σε διαφορετική χρονική στιγμή και/ή σε διαφορετικές τοποθεσίες. Για παράδειγμα, ένα αυτοκίνητο ίσως αποθηκεύσει ένα μήνυμα προειδοποίησης για προσέγγιση αυτοκινήτου έκτακτης ανάγκης που έλαβε και το χρησιμοποιήσει αργότερα.

Ανάγκες ασφάλειας και προστασίας προσωπικών δεδομένων

Σε γενικές γραμμές, η αυξημένη κίνηση στο δίκτυο των αυτοκινήτων μπορεί να θεωρηθεί κάτι το εχθρικό παρά συνεργατικό. Επιπλέον, είναι σημαντικό να διασφαλιστεί η αξιοπιστία του δικτύου μέσω πρωτοκόλλων ασφαλείας που λειτουργούν παρά την εσφαλμένη συμπεριφορά των συμμετεχόντων. Τα μελλοντικά δίκτυα αυτοκινήτων πρέπει να εγγυηθούν τις ακόλουθες ιδιότητες:

- **Ανωνυμία:** η πλήρης ταυτότητα ενός αυτοκινήτου που στέλνει πακέτα/δεδομένα πρέπει να διατηρηθεί ιδιωτική. Οι αρχές της προστασίας προσωπικών δεδομένων του ITS της Αμερικής περιλαμβάνουν την Αρχή της Ανωνυμίας η οποία εκφράζεται ως εξής: «Όπου είναι πρακτικά δυνατόν, τα άτομα θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν τα Έξυπνα Συστήματα Μεταφορών σε ανώνυμη βάση». Η απαίτηση αυτή της ανωνυμίας είναι πολύ σημαντική. Οι άνθρωποι που φοβούνται ότι τους παρακολουθούν μπορεί να απενεργοποιήσουν την επικοινωνία, γεγονός που έχει αντίκτυπο στην ασφάλεια και σε άλλα οφέλη. Τα σύστημα επίσης θα πρέπει να επιβεβαιώσει στους ανθρώπους ότι ο «Μεγάλος Αδερφός» δεν βρίσκεται στη θέση του συνοδηγού.
- **Αυθεντικότητα:** το σύστημα θα πρέπει να διασφαλίσει ότι τα πακέτα/δεδομένα δημιουργούνται από έμπιστη πηγή. Μπορεί η προστασία των προσωπικών δεδομένων και η ανωνυμία να είναι σημαντικές για την κοινωνική και επιχειρηματική ζωή, αλλά η αυθεντικότητα είναι βασική για την επιβίωση.
- **Ακεραιότητα:** το σύστημα θα πρέπει να διασφαλίσει ότι τα πακέτα/δεδομένα δεν παραποιήθηκαν ούτε άλλαξαν μετά την δημιουργία τους. Η ακεραιότητα δεν έχει να κάνει με την προέλευση των δεδομένων (ποιος τα δημιούργησε, πότε ή πώς), αλλά με το αν έχουν τροποποιηθεί ύστερα από τη δημιουργία τους.

- **Υπευθυνότητα:** το σύστημα θα πρέπει να έχει την ικανότητα να αποδώσει τις ενέργειες στην οντότητα που τις προκάλεσε, σε περίπτωση σύγκρουσης.
- **Ικανότητα ανάκλησης:** το σύστημα θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να απορρίπτει τα μηνύματα από μονάδες που είναι εκτεθειμένες σε κίνδυνο.
- **Περιορισμοί πραγματικού χρόνου:** η λύση της ασφάλειας που θα υιοθετηθεί θα πρέπει να επιτρέπει γρήγορη επικοινωνία. Τα μηνύματα ασφάλειας είναι πολύ ευαίσθητα στον παράγοντα χρόνο. Οι περισσότερες εφαρμογές ασφαλείας απαιτούν χρόνο απόκρισης μικρότερο από εκατό χιλιοστά του δευτερολέπτου (100 ms).

Η ασφάλεια αποτελεί μια μεγάλη πρόκληση. Είναι σημαντικό να είναι διασφαλισμένο ότι οι κρίσιμες για τη ζωή πληροφορίες δεν μπορούν να δημιουργηθούν ή να τροποποιηθούν από έναν εισβολέα. Ωστόσο, οι περισσότεροι μηχανισμοί ασφαλείας θα οδηγήσουν σε σημαντική επιβάρυνση. Αυτό μπορεί να μειώσει σημαντικά τις δυνατότητες του συστήματος από την άποψη του χρόνου απόκρισης και/ή την χωρητικότητα του διαύλου.

Η προστασία της ιδιωτικής ζωής είναι μια άλλη μεγάλη πρόκληση. Για να εξασφαλιστεί η υπευθυνότητα, τα μηνύματα θα πρέπει να έχουν υπογραφεί μοναδικά. Ωστόσο, οι μοναδικές υπογραφές θα επιτρέψουν στον υπογράφων να παρακολουθείται και τελικά να αποκαλύψει την πραγματική του ταυτότητα.

Μετριασμός της απειλής

Για την επίτευξη της αυθεντικότητας και ακεραιότητας, τα μηνύματα που αποστέλλονται θα πρέπει να είναι υπογεγραμμένα και τα μηνύματα που λαμβάνονται θα πρέπει να επαληθεύονται. Σε ένα VANET, οι υπογραφές δημόσιου-κλειδιού είναι γενικά πιο επιθυμητές, διότι οι εφαρμογές μετάδοσης κυριαρχούν και οι στόχοι των μηνυμάτων είναι όλα τα αυτοκίνητα στην περιοχή.

Οι ψηφιακές υπογραφές παρέχουν ένα επίπεδο ελέγχου της αυθεντικότητας για τα μηνύματα, εξασφαλίζουν την ακεραιότητα των μηνυμάτων και διατηρούν την ευθύνη του αρχικού αποστολέα για τα μηνύματά του. Επιπλέον, όλα τα μηνύματα των εφαρμογών πρέπει να περιλαμβάνουν τόσο αριθμούς ακολουθίας όσο και χρονικά στίγματα. Αυτό θα εμποδίσει αποτελεσματικά την επανάληψη νόμιμων μηνυμάτων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και διαφορετικούς τόπους.

Ωστόσο, οι μοναδικές υπογραφές θα αποκαλύψουν την ταυτότητα των αποστολέων. Όταν οι εφαρμογές ασφαλείας των αυτοκινήτων μεταδίδουν μηνύματα για την τρέχουσα θέση ενός αυτοκινήτου, την ταχύτητά του και την κατεύθυνσή του με μια μοναδική υπογραφή δέκα φορές ανά δευτερόλεπτο τότε το αυτοκίνητο αυτό μπορεί να εντοπιστεί πολύ εύκολα. Βασικά, κάθε κίνηση που κάνει ένα αυτοκίνητο θα μπορούσε να παρακολουθείται.

Κλείνοντας θα αναφέρουμε ότι η ασφάλεια και ταυτόχρονα η προστασία των προσωπικών δεδομένων και η διασφάλιση της ιδιωτικής ζωής του καθενός είναι σημαντικά ζητήματα αλλά και ίσως αντικρουόμενα κατά την υλοποίηση ενός VANET. Για περισσότερες λεπτομέρειες και λύσεις πάνω σε αυτά τα θέματα ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται στα [54-57].

Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μια εισαγωγή στις τεχνικές σύντηξης δεδομένων και στα ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων που βρίσκονται στο επίκεντρο των ευφυών συστημάτων μεταφοράς, τόσο από τεχνολογικής άποψης όσο και ως προς το πεδίο εφαρμογών. Επίσης παρουσιάστηκαν κάποιες βασικές έννοιες και όροι που θα χρησιμοποιηθούν σε όλη την έκταση της διατριβής.

Το σημαντικότερο πρόβλημα στα ευφυή συστήματα μεταφοράς είναι η αντίληψη των συνθηκών του οδικού περιβάλλοντος από τον οδηγό με απώτερο σκοπό την μείωση των τροχαίων ατυχημάτων. Η χρήση αισθητήρων στο αυτοκίνητο, όπως ραντάρ και κάμερες, και η επεξεργασία των δεδομένων τους βοηθάει τον οδηγό στην αντίληψη του οδικού περιβάλλοντος αλλά δεν είναι αρκετή. Για να επεκταθεί ακόμα περισσότερο ο ορίζοντας αντίληψης του οδηγού πρέπει να προαχθεί η χρήση ασύρματης δικτύωσης μεταξύ αυτοκινήτων. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζονται αυτο-οργανούμενα δίκτυα αυτοκινήτων που ανταλλάσσουν ποικίλες πληροφορίες μεταξύ τους και επομένως μπορούν να ενημερώνονται για γεγονότα ακόμα και μερικές εκατοντάδες μέτρα ή ακόμα και μερικά χιλιόμετρα μακριά. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στη σύντηξη των δεδομένων που προέρχονται από τις διάφορες πηγές καθώς τα δεδομένα αυτά θα πρέπει να είναι συγχρονισμένα προτού γίνει περαιτέρω επεξεργασία.

Στο παρόν κεφάλαιο αρχικά παρουσιάστηκε το πιο διαδεδομένο μοντέλο για τη σύντηξη δεδομένων καθώς και οι διάφορες αρχιτεκτονικές σύντηξης. Στη συνέχεια αναλύθηκαν τα ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων και κάποια από τα χαρακτηριστικά τους. Στο Κεφάλαιο 2 που ακολουθεί θα γίνει η παρουσίαση της αρχιτεκτονικής ενός δικτύου αυτοκινήτων και θα αναλυθούν οι διαφορετικές κατηγορίες εφαρμογών που προκύπτουν για τέτοιου είδους δίκτυα. Τέλος, θα παρατεθούν και κάποια παραδείγματα από κάθε κατηγορία.

ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ & ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Έπειτα από μια γενική εισαγωγή στις τεχνικές σύντηξης δεδομένων και στα ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια αρχιτεκτονική αναφοράς ενός τέτοιου συστήματος και αναλύονται οι διαφορετικές κατηγορίες εφαρμογών που προκύπτουν.

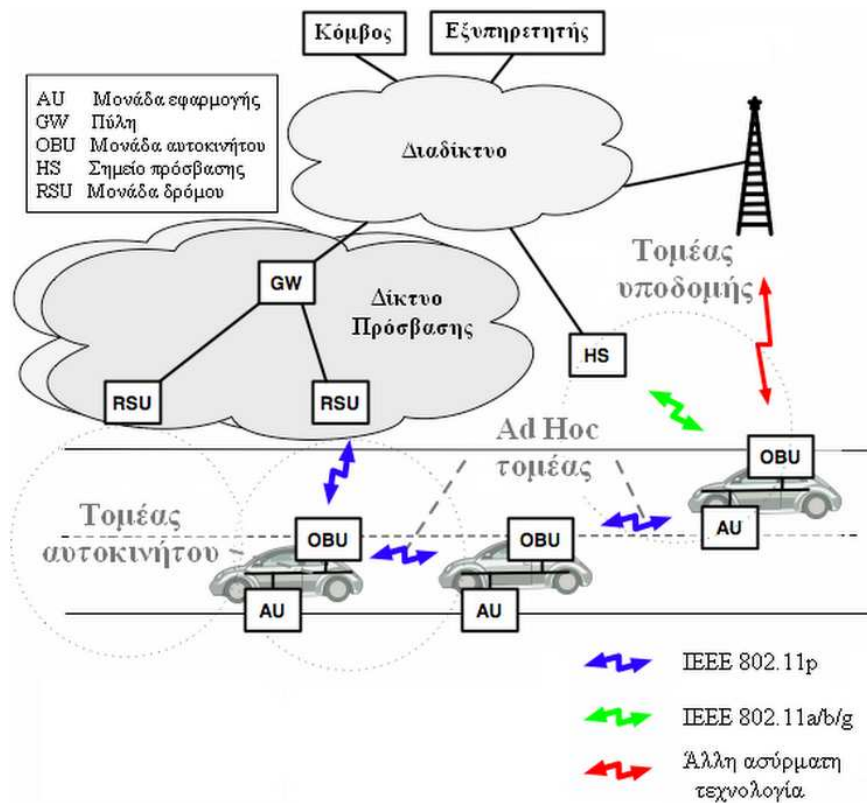
Αρχικά, γίνεται μια γενική επισκόπηση του συστήματος των αυτοκινήτων που επικοινωνούν ασύρματα μεταξύ τους και παρουσιάζονται οι διαφορετικοί τομείς του. Ακολούθως, παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική αναφοράς ενός κόμβου του δικτύου και αναλύονται τα διαφορετικά τμήματά της. Ιδιαίτερα σημαντικά τμήματα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι ο τοπικός δυναμικός χάρτης και το σύστημα σύντηξης δεδομένων. Επιπλέον δίνεται και ένα παράδειγμα υλοποίησης της αρχιτεκτονικής αυτής σε κόμβο-αυτοκίνητο και σε κόμβο-υποδομή.

Τέλος, το κεφάλαιο αυτό κλείνει με την κατηγοριοποίηση των εφαρμογών σε εφαρμογές ασφάλειας, αποδοτικότητας κυκλοφορίας και ψυχαγωγίας, ενώ ταυτόχρονα δίνονται και κάποια παραδείγματα για κάθε κατηγορία.

2.1 Γενική επισκόπηση του συστήματος

Μία πολύ γενική θεώρηση της αρχιτεκτονικής του συστήματος επικοινωνίας μεταξύ αυτοκινήτων και μεταξύ αυτοκινήτων και υποδομής φαίνεται στην Εικόνα 13. Η αρχιτεκτονική αυτή αποτελείται από τρεις διαφορετικούς τομείς: τον τομέα του αυτοκινήτου, τον ad hoc τομέα και τον τομέα της υποδομής [34,35].

Ο **τομέας του αυτοκινήτου** αναφέρεται σε ένα δίκτυο που αποτελείται από μία μονάδα εντός του αυτοκινήτου (on-board unit - OBU) και ενδεχομένως πολλαπλές μονάδες εφαρμογής (application units - AUs). Μια μονάδα εφαρμογής είναι συνήθως μια ειδική συσκευή που εκτελεί μία εφαρμογή ή ένα σύνολο εφαρμογών και αξιοποιεί τις δυνατότητες επικοινωνίας της OBU. Μια AU μπορεί να αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του αυτοκινήτου και να είναι μόνιμα συνδεδεμένη με μία OBU. Μπορεί επίσης να είναι μια φορητή συσκευή όπως laptop, PDA (Personal Digital Assistant) ή ένα χειριστήριο παιχνιδιών που μπορεί δυναμικά να συνδέεται με (και να αποσπάται από) ένα OBU. Η AU και η OBU συνδέονται συνήθως με ενσύρματη σύνδεση, αλλά η σύνδεση μπορεί να είναι και ασύρματη, όπως με χρήση Bluetooth, WUSB (wireless USB) ή UWB (Ultra-wideband). Η διάκριση μεταξύ της AU και της OBU είναι λογική, καθώς μπορούν να βρίσκονται σε μία ενιαία φυσική μονάδα.



Εικόνα 13: Γενική θεώρηση της αρχιτεκτονικής του συστήματος

Ο **ad hoc τομέας**, ή αλλιώς το VANET, αποτελείται από αυτοκίνητα εξοπλισμένα με OBUs και από σταθερές μονάδες κατά μήκος του δρόμου, που ονομάζονται μονάδες στην πλευρά του δρόμου (road-side units - RSUs). Μια OBU είναι τουλάχιστον εξοπλισμένη με μία (μικρής εμβέλειας) ασύρματη συσκευή επικοινωνίας ειδικά διαμορφωμένη για την οδική ασφάλεια, και ενδεχομένως με άλλες προαιρετικές συσκευές επικοινωνίας. Οι OBUs σχηματίζουν ένα κινητό ad hoc δίκτυο (Mobile ad hoc network - MANET), το οποίο επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων με έναν πλήρως καταναμημένο τρόπο χωρίς την ανάγκη για κεντρικό συντονισμό. Οι OBUs επικοινωνούν απευθείας, αν υπάρχει δυνατότητα ασύρματης σύνδεσης μεταξύ τους. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει απευθείας σύνδεση, ειδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης επιτρέπουν multi-hop επικοινωνία, όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, όπου τα δεδομένα προωθούνται από μία OBU σε μία άλλη μέχρι να φτάσουν στον τελικό προορισμό τους. Ο πρωταρχικός ρόλος μιας RSU είναι η βελτίωση της οδικής ασφάλειας, με την εκτέλεση ειδικών εφαρμογών και με την αποστολή, τη λήψη ή την προώθηση δεδομένων στον ad hoc τομέα, προκειμένου να επεκταθεί η κάλυψη του ad hoc δικτύου. Οι OBUs και οι RSUs μπορούν να θεωρηθούν σαν κινητοί και στατικοί κόμβοι αντίστοιχα ενός ad hoc δικτύου. Μια RSU μπορεί να συνδεθεί σε ένα δίκτυο υποδομής, το οποίο με τη σειρά του μπορεί να συνδεθεί με το Διαδίκτυο (Internet). Σαν αποτέλεσμα, οι RSUs μπορεί να επιτρέψουν στις OBUs να έχουν πρόσβαση στην υποδομή. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό για τις AUs που έχουν καταχωρηθεί σε μία OBU να επικοινωνούν με οποιονδήποτε υπολογιστή που παρέχει υπηρεσίες (host) στο Διαδίκτυο, όταν τουλάχιστον μία RSU που είναι συνδεδεμένη στην υποδομή είναι διαθέσιμη.

Στον ad hoc τομέα, δύο ή περισσότερες RSUs μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους απευθείας ή μέσω multi-hop επικοινωνιών μέσω του ίδιου είδους πρωτοκόλλων δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται για τις επικοινωνίες μεταξύ OBUs και RSUs.

Μια OBU μπορεί επίσης να είναι εξοπλισμένη με εναλλακτικές ασύρματες τεχνολογίες, τόσο για εφαρμογές που αφορούν την ασφάλεια όσο και για άλλες. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 13, μία OBU μπορεί επίσης να επικοινωνεί με κόμβους του Διαδικτύου ή εξυπηρετητές (servers) μέσω δημόσιων, εμπορικών ή ιδιωτικών σημείων πρόσβασης (hot spots - HS) (αφορά επίσης και "Wi-Fi hot spots") που λειτουργούν μεμονωμένα στο σπίτι ή στο γραφείο ή προέρχονται από παρόχους ασύρματων διαδικτυακών υπηρεσιών.

Ενώ οι RSUs για πρόσβαση στο διαδίκτυο συνήθως στήνονται μέσα από μία ελεγχόμενη διαδικασία από φορείς, όπως είναι οι διαχειριστές των δρόμων ή άλλες δημόσιες αρχές, τα δημόσια ή ιδιωτικά HS στήνονται συνήθως σε ένα λιγότερο ελεγχόμενο περιβάλλον. Αυτά τα δύο είδη πρόσβασης στον **τομέα υποδομής**, δηλαδή η RSU και το HS, αντιστοιχούν σε διαφορετικούς τύπους εφαρμογών. Σε περίπτωση που ούτε οι RSUs ούτε τα HS παρέχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο, οι OBUs μπορούν επιπλέον να αξιοποιήσουν τις δυνατότητες επικοινωνίας των κυβελωτών δικτύων (GSM, GPRS, UMTS, HSDPA, WiMax, 4G), εάν είναι ενσωματωμένες στην OBU, ιδίως για εφαρμογές μη σχετιζόμενες με την ασφάλεια.

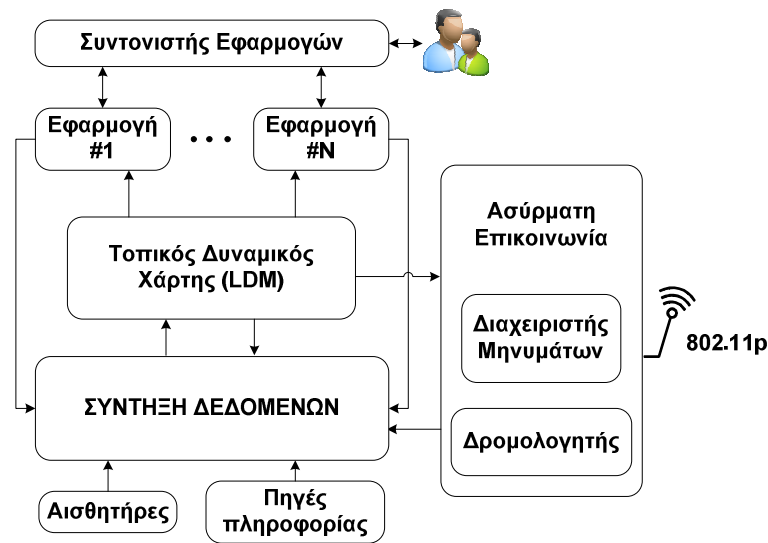
Ο τομέας της υποδομής συνδέεται με μία υποδομή δημόσιου κλειδιού (Public Key Infrastructure - PKI) για λόγους πιστοποίησης. Η PKI είναι στην ουσία ένα σύνολο υλικού, λογισμικού, ανθρώπων, πολιτικών και διαδικασιών που απαιτούνται για τη δημιουργία, διαχείριση, διανομή, χρήση, αποθήκευση και ανάκληση ψηφιακών πιστοποιητικών. Η Αρχή Πιστοποίησης είναι μια οντότητα που εκδίδει ψηφιακά πιστοποιητικά για τις OBUs και τις RSUs. Τα πιστοποιητικά αυτά χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων, για να βεβαιώσουν ότι τα διαπιστευτήρια ασφαλείας ανήκουν σε ένα συγκεκριμένο κόμβο. Η χρήση τους προορίζεται για την υλοποίηση μιας συνολικής πολιτικής ασφαλείας, η οποία είναι έξω από τα πλαίσια του παρόντος εγγράφου.

2.2 Αρχιτεκτονική αναφοράς

Σκοπός αυτής της παραγράφου είναι να παρουσιάσει μια γενική αρχιτεκτονική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αρχιτεκτονική αναφοράς για την ανάπτυξη συνεργατικών συστημάτων στις μεταφορές. Ένας από τους σημαντικότερους στόχους μιας αρχιτεκτονικής αναφοράς είναι να διασφαλίσει τη συνοχή και τη διαλειτουργικότητα των συστατικών στοιχείων ολόκληρου του συστήματος και κατ' επέκταση να διασφαλίσει ότι το τελικό σύστημα θα πληροί τους αντικειμενικούς σκοπούς του.

Στην Εικόνα 14 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα της αρχιτεκτονικής αναφοράς του συστήματος. Η αρχιτεκτονική αυτή είναι γενική και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην περίπτωση ενός κόμβου-αυτοκινήτου όσο και στην περίπτωση ενός κόμβου-σταθμού βάσης. Στη συνέχεια ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των διαφόρων τμημάτων αυτής της αρχιτεκτονικής. Κεντρικό ρόλο σε αυτή την αρχιτεκτονική παίζουν

κυρίως ο τοπικός δυναμικός χάρτης (Local Dynamic Map - LDM), το σύστημα σύντηξης δεδομένων και η ασύρματη επικοινωνία.



Εικόνα 14: Διάγραμμα αρχιτεκτονικής αναφοράς

2.2.1 Τοπικός Δυναμικός Χάρτης

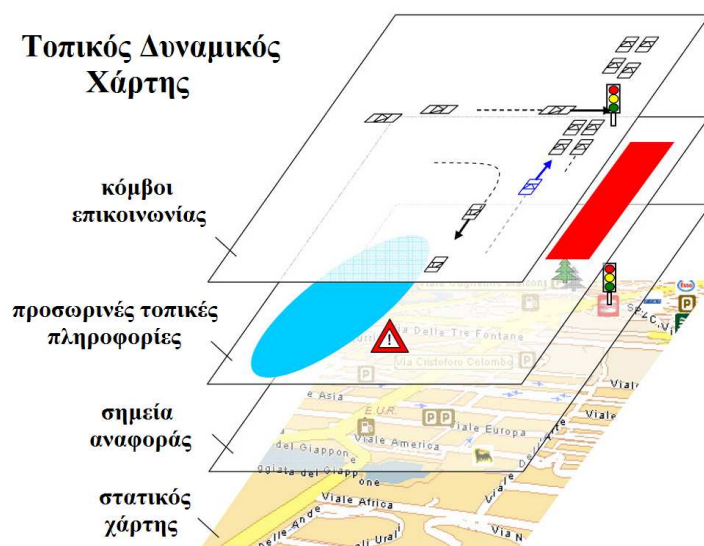
Ο τοπικός δυναμικός χάρτης [58,59] είναι χτισμένος πάνω σε μία βάση δεδομένων ψηφιακού χάρτη και αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά συστατικά στοιχεία των μελλοντικών συνεργατικών συστημάτων ασφαλείας. Στον LDM η γεωμετρία του δρόμου από ένα τυπικό ψηφιακό χάρτη συμπληρώνεται με πληροφορίες που συλλέγονται από άλλα αυτοκίνητα και από τους σταθμούς βάσης. Στην ουσία ο LDM αποτελεί μια απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο των στατικών και δυναμικών στοιχείων της υποδομής (π.χ. τμήματα δρόμου, φωτεινοί σηματοδότες) καθώς και των αντικειμένων (π.χ. εμπόδια, αυτοκίνητα) στην περιοχή γύρω από το υποκείμενο αυτοκίνητο. Επίσης, εκτός από την αποθήκευση επιτρέπει και την ενημέρωση στοιχείων και αντικειμένων, συμπεριλαμβανομένου του τύπου, της θέσης και άλλων χαρακτηριστικών τους. Επιπλέον, επιτρέπει την ανάκτηση επιλεγμένων πληροφοριών για περαιτέρω επεξεργασία, όπως είναι ο υπολογισμός τροχιών, καθώς και τον εντοπισμό επικίνδυνων εμποδίων και ενδεχόμενων συγκρούσεων με άλλους χρήστες του οδικού δικτύου.

Η μονάδα αυτή αποτελεί στην ουσία μια δυναμική βάση δεδομένων ολόκληρου του συστήματος. Μόνο το σύστημα σύντηξης δεδομένων, το οποίο θα αναλύσουμε στην επόμενη παράγραφο, επιτρέπεται να αποθηκεύσει νέα δεδομένα ή να ενημερώσει τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα του LDM. Τα υπόλοιπα τμήματα της αρχιτεκτονικής, όπως είναι οι εφαρμογές, μπορούν μόνο να κάνουν ερωτήματα στη βάση δεδομένων και να ανακτήσουν τις τιμές των επιθυμητών παραμέτρων.

Ο LDM αποτελείται από τέσσερα διαφορετικά στρώματα τα οποία φαίνονται στην Εικόνα 15. Τα στρώματα αυτά από κάτω προς τα πάνω είναι τα ακόλουθα:

- Στρώμα 1 - η βάση δεδομένων του στατικού χάρτη
- Στρώμα 2 - πρόσθετες στατικές πληροφορίες που δεν υπάρχουν στην τυπική βάση δεδομένων του χάρτη
- Στρώμα 3 - προσωρινές και δυναμικές πληροφορίες (π.χ. καιρικές συνθήκες, κυκλοφορία)
- Στρώμα 4 - δυναμικά και πολύ δυναμικά αντικείμενα

Στο κατώτερο στρώμα βρίσκονται τα δεδομένα από τον κλασικό στατικό χάρτη που χρησιμοποιούνται σήμερα στα συστήματα πλοήγησης, ενδεχομένως με ενισχυμένη γεωμετρία και χαρακτηριστικά. Το δεύτερο στρώμα δεν είναι πολύ διαφορετικό από το κατώτερο στρώμα και περιέχει στατικές πληροφορίες (κυρίως ιδιότητες) που δεν περιλαμβάνονται ακόμη στους τυπικούς χάρτες, αλλά μπορεί να ενσωματωθούν στο μέλλον. Το τρίτο στρώμα είναι για προσωρινές και δυναμικές πληροφορίες, για παράδειγμα πληροφορίες που σχετίζονται με την κυκλοφορία και τον καιρό. Το τέταρτο και το ανώτερο στρώμα παρέχει μια απεικόνιση των εξαιρετικά δυναμικών πληροφοριών, κυρίως αντικείμενα που είναι σε θέση να κινηθούν (αυτοκίνητα, πεζοί, ποδήλατα και ζώα), δυναμικούς κόμβους επικοινωνίας (που συμπίπτουν με ορισμένους χρήστες του οδικού δικτύου, κυρίως αυτοκίνητα) και άλλα σχετικά αντικείμενα, κοντά στο υποκείμενο αυτοκίνητο, με βάση τις πληροφορίες που προέρχονται από τους αισθητήρες του υποκείμενου αυτοκινήτου καθώς και πληροφορίες που προέρχονται από άλλα αυτοκίνητα και από την υποδομή μέσω ασύρματης επικοινωνίας.



Εικόνα 15: Τα στρώματα του τοπικού δυναμικού χάρτη

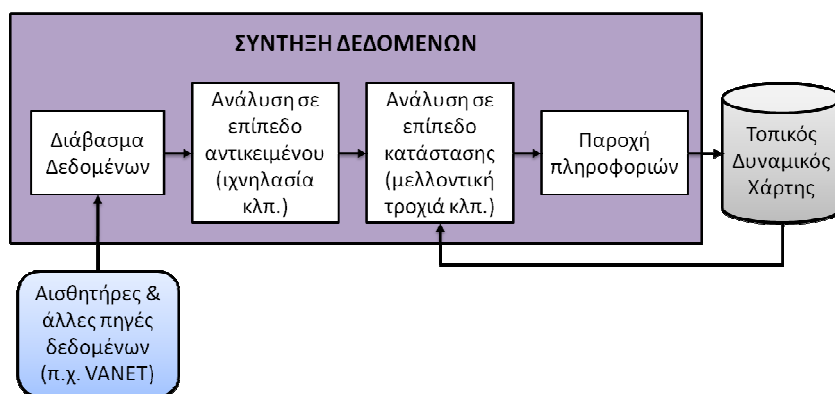
Ο τοπικός δυναμικός χάρτης δεν είναι απλά μια αποθήκη δεδομένων, δηλαδή δεν είναι απλώς μια συλλογή από μη ταξινομημένες λίστες/πίνακες στατικών και δυναμικών αντικειμένων του χάρτη. Αποτελεί ένα πραγματικό εξυπηρετητή με συγκεκριμένες λειτουργίες πρόσβασης, όπως είναι η αναζήτηση, η ομαδοποίηση και το φιλτράρισμα. Συνεπώς, ένα ερώτημα στον LDM είναι κάτι περισσότερο από ένα απλό αίτημα για στοιχεία δεδομένων και παραμέτρους αυτών. Ο LDM προκειμένου να εξυπηρετήσει ένα

ερώτημα θα πρέπει να κάνει προηγουμένως κάποια αξιολόγηση. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια «σχέσεων» και «συνθηκών/χαρακτηριστικών» καθώς και συνδυασμό αυτών. Συνήθως οι «σχέσεις» αυτές αφορούν το χώρο και το χρόνο (π.χ. «βρες τα αντικείμενα γύρω μου τόσο στο παρόν όσο και στο μέλλον», «βρες τις περιοχές τις οποίες η τροχιά μου θα τέμνει ... », κλπ.), ενώ τα «χαρακτηριστικά/συνθήκες» αφορούν κάποια ιδιότητα ενός στατικού ή δυναμικού αντικειμένου (π.χ. όλα τα αυτοκίνητα έκτακτης ανάγκης, μόνο κινούμενα αντικείμενα, τμήματα των δρόμων του οδικού δικτύου με ολισθηρό οδόστρωμα κλπ.).

Συμπερασματικά, για την αναγνώριση μιας κατάστασης του συστήματος απαιτείται ένας συνδυασμός σχέσεων και χαρακτηριστικών/συνθηκών που έχουν διατυπωθεί από τους χρήστες/πελάτες του LDM εξυπηρετητή, δηλαδή τις εφαρμογές και το σύστημα παραγωγής μηνυμάτων του ασύρματου δικτύου, το οποίο θα αναλύσουμε στη συνέχεια. Αυτό σημαίνει ότι οι εφαρμογές πρέπει να ενδιαφέρονται όχι μόνο στο τι ακριβώς θέλουν να βρουν στη βάση (σαν μεμονωμένα τμήματα δεδομένων), αλλά και στο πότε και πώς θα ζητήσουν τα δεδομένα αυτά. Αυτό μπορεί να γίνεται είτε περιοδικά είτε ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση.

2.2.2 Σύστημα Σύντηξης Δεδομένων

Το σύστημα σύντηξης δεδομένων ξεκινά με τη λήψη πληροφοριών από τους αισθητήρες και κάποιες άλλες πηγές, συνεχίζει με την επεξεργασία των δεδομένων αυτών σε διαφορετικά επίπεδα (αντικείμενου και κατάστασης) και καταλήγει στην αποθήκευση συγκεκριμένων πληροφοριών στη βάση δεδομένων ή αλλιώς LDM. Τα διάφορα τμήματα της μονάδας σύντηξης δεδομένων που φαίνονται στην Εικόνα 16 περιγράφονται εν συντομία στη συνέχεια της παραγράφου.



Εικόνα 16: Σύστημα σύντηξης δεδομένων

Διάβασμα δεδομένων

Τα δεδομένα που εισάγονται στο σύστημα σύντηξης μπορεί να προέρχονται από τις ακόλουθες διαφορετικές πηγές:

- συστήματα ανίχνευσης όπως είναι οι αισθητήρες στο δρόμο, οι αισθητήρες του αυτοκινήτου κλπ.,

- εξωτερικές πηγές (π.χ. δεδομένα από τα κέντρα πληροφόρησης για την κυκλοφορία, συστήματα αστικού ελέγχου της κυκλοφορίας),
- πληροφορίες που λαμβάνονται από άλλα αυτοκίνητα μέσω της ασύρματης επικοινωνίας,
- δεδομένα από τις εφαρμογές, όπως π.χ. η προβολή μιας τροχιάς η οποία πρέπει να ελεγχθεί από το σύστημα σύντηξης προτού αποθηκευτεί στη βάση για λόγους συνοχής,
- δεδομένα που προκύπτουν από τον LDM μέσω του μηχανισμού των ερωτημάτων.

Έξοδος	Προέλευση	Ρυθμός
Γεωγραφική θέση, ταχύτητα, γωνιακή ταχύτητα, κατεύθυνση, επιτάχυνση, συνδιακυμάνσεις του υποκείμενου αυτοκινήτου	Υποσύστημα εύρεσης θέσης (συνδυασμός δεδομένων GPS, αισθητήρων αντίληψης και διαύλου CAN-C)	12.5 Hz
Γωνία στροφής τιμονιού, ρυθμός μεταβολής της γωνίας του υποκείμενου αυτοκινήτου	Δίαυλος CAN-C μέσω της gateway του αυτοκινήτου	12 Hz
Πεντάλ γκαζιού, πίεση κυλίνδρου (σύστημα πέδησης) του υποκείμενου αυτοκινήτου	Δίαυλος CAN-C μέσω της gateway του αυτοκινήτου	25 Hz
Κατάσταση των φρένων, ABS/ESP του υποκείμενου αυτοκινήτου	Δίαυλος CAN-C μέσω της gateway του αυτοκινήτου	1 Hz/Με την παρουσία συμβάντος
Κατάσταση προβολέων, αισθητήρας σύγκρουσης του υποκείμενου αυτοκινήτου	Δίαυλος CAN-B μέσω της gateway του αυτοκινήτου	1 Hz/ Με την παρουσία συμβάντος
Κατάσταση των καυσίμων, των θυρών, του χειρόφρενου, εξωτερική θερμοκρασία του υποκείμενου αυτοκινήτου	Δίαυλος CAN-B μέσω της gateway του αυτοκινήτου	0.016 Hz
Περιγραφή του υποκείμενου αυτοκινήτου, διαστάσεις, είδος αγαθών	Gateway του αυτοκινήτου	0.016 Hz
Τύπος της κοντινότερης RSU, θέση αυτής, δεδομένα καιριικών συνθηκών και κυκλοφορίας	Περιοδικά μηνύματα από το VANET	2 Hz
Κατάσταση του δρόμου στην κοντινότερη RSU, φωτεινός σηματοδότης, πινακίδες κυκλοφορίας, προτεινόμενη ταχύτητα κλπ.	Εκτεταμένα περιοδικά μηνύματα από το VANET	Με την παρουσία συμβάντος
Μήνυμα κοντινότερης RSU	Εκτεταμένα περιοδικά μηνύματα από το VANET	Με την παρουσία συμβάντος

Πίνακας 2: Τυπική έξοδος της διαδικασίας διαβάσματος δεδομένων

Όλα τα δεδομένα εισόδου της πλατφόρμας σύντηξης δεδομένων που προέρχονται από τις διάφορες πηγές που αναφέρονται παραπάνω παραλαμβάνονται από την διαδικασία διαβάσματος δεδομένων. Μόλις γίνει η λήψη και η αποκωδικοποίηση των δεδομένων αυτών αποθηκεύονται σε μια κοινή μνήμη, όπου τα στοιχεία αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις υπόλοιπες διαδικασίες (π.χ. ανάλυση σε επίπεδο αντικειμένου, ανάλυση σε επίπεδο κατάστασης). Ενδεικτικά δεδομένα εξόδου από τη διαδικασία διαβάσματος δεδομένων, τα οποία αποθηκεύονται στην κοινή μνήμη, δίνονται στον Πίνακα 2.

Ανάλυση σε επίπεδο αντικειμένου

Η διαδικασία ανάλυσης σε επίπεδο αντικειμένου είναι επιφορτισμένη με την ανίχνευση της παρουσίας αντικειμένων στην περιοχή γύρω από το υποκείμενο αυτοκίνητο καθώς και την εκτίμηση των ιδιοτήτων τους. Χρησιμοποιεί αισθητήρες οι οποίοι βρίσκονται πάνω στο αυτοκίνητο και μηνύματα VANET που λαμβάνει από άλλα αυτοκίνητα. Οι αισθητήρες που βρίσκονται στο αυτοκίνητο ποικίλουν και μπορεί να είναι αισθητήρες για την αντίληψη του οδικού περιβάλλοντος, όπως σαρωτές λέιζερ και ραντάρ μεγάλης εμβέλειας, καθώς και μια σειρά αισθητήρες που αφορούν τη δυναμική κατάσταση του αυτοκινήτου, π.χ. αισθητήρες γωνιακής ταχύτητας, ταχύτητας και κατάστασης του δείκτη κατεύθυνσης (φλας). Τα διαδοχικά στάδια της διαδικασίας ανάλυσης αντικειμένου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε επεξεργασία σε επίπεδο αισθητήρα και σε επεξεργασία σε κεντρικό επίπεδο.

Έξοδος	Προέλευση	Ρυθμός
Δυναμική κατάσταση των υπόλοιπων αυτοκινήτων: γεωγραφική θέση, ταχύτητα, κατεύθυνση, γωνιακή ταχύτητα, πλευρική/διαμήκης επιτάχυνση, γωνία τιμονιού, συνδιακυμάνσεις κλπ.	Περιοδικά μηνύματα από το VANET και αισθητήρες αντίληψης	12.5 Hz
Η κατάσταση του πεντάλ του γκαζιού, του φρένου των προβολέων των υπόλοιπων αυτοκινήτων	Περιοδικά μηνύματα από το VANET	2 Hz
Περιγραφή και διαστάσεις των υπόλοιπων αυτοκινήτων	Περιοδικά μηνύματα από το VANET	2 Hz
Η κατάσταση του ABS, ESP, των αερόσακων των υπόλοιπων αυτοκινήτων, γεγονότα έκτακτης ανάγκης	Εκτεταμένα περιοδικά μηνύματα από το VANET	Με την παρουσία συμβάντος

Πίνακας 3: Τυπική έξοδος της ανάλυσης σε επίπεδο αντικειμένου

Οι αισθητήρες αντίληψης του οδικού περιβάλλοντος μπορεί ήδη να χρησιμοποιούν πληροφορίες από το VANET και από τους στατικούς χάρτες κατά τη διαδικασία της ιχνηλασίας των γειτονικών

αντικειμένων. Περαιτέρω επεξεργασία σε επίπεδο αισθητήρα περιλαμβάνει ελέγχους της εγκυρότητας όλων των στοιχείων που παρέχονται από τη διαδικασία διαβάσματος, μετατροπές συντεταγμένων και χρονικές ευθυγραμμίσεις σε ένα κοινό χωροχρονικό σύστημα αναφοράς. Ο έλεγχος εγκυρότητας αξιολογεί τα δεδομένα και τη συνοχή αυτών και απορρίπτει, πιθανώς, κάποια από αυτά πριν επιβαρυνθεί περαιτέρω η μονάδα σύντηξης. Οι μετατροπές και οι ευθυγραμμίσεις βασίζονται σε μοντέλα κίνησης για κάθε αντικείμενο και απαιτούν ακριβή χρονικό συγχρονισμό μεταξύ όλων των αυτοκινήτων και των συστημάτων υποδομής. Αυτό γίνεται με χρήση του χρονικού στιγμιαίου του GPS και του NTP (Network Time Protocol) πρωτοκόλλου.

Η σύντηξη σε κεντρικό επίπεδο περιλαμβάνει τη συσχέτιση αντικειμένων από τους διάφορους αισθητήρες αντίληψης με τα δεδομένα από το VANET καθώς και τη διαχείριση των αντικειμένων αυτών (αρχικοποίηση, επιβεβαίωση, διαγραφή). Το αποτέλεσμα της συσχέτισης περιλαμβάνει την περιγραφή των αντικειμένων τόσο σε σχετικές όσο και σε απόλυτες συντεταγμένες, τα χαρακτηριστικά και τις τιμές εμπιστοσύνης των αντικειμένων (συνδιακυμάνσεις) που δείχνουν το επίπεδο της αντιστοίχισης των διαφορετικών αισθητήρων (βλέπε Πίνακα 3). Τέλος, η ιστορία του κάθε αντικειμένου διατηρείται ώστε να υποστηριχτεί η εισαγωγή του αντικειμένου στον LDM.

Ανάλυση σε επίπεδο κατάστασης

Ενώ η ανάλυση σε επίπεδο αντικειμένου ασχολείται με τις ιδιότητες των μεμονωμένων αντικειμένων, η ανάλυση σε επίπεδο κατάστασης ασχολείται με τις σχέσεις μεταξύ των αντικειμένων (συμπεριλαμβανομένων και των στατικών αντικειμένων). Μια ποικιλία αλγορίθμων και μεθοδολογιών σύντηξης (π.χ. δίκτυα Bayes, ασαφής λογική) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτό το επίπεδο. Οι κυριότεροι αλγόριθμοι για την ανάλυση σε επίπεδο κατάστασης αφορούν την πρόβλεψη της μελλοντικής τροχιάς, την ανίχνευση του επικείμενου ελιγμού του κάθε αυτοκινήτου και την εκτίμηση της κυκλοφοριακής πυκνότητας στην εγγύς περιοχή. Για την πρόβλεψη της μελλοντικής πορείας των αυτοκινήτων, ο συνδυασμός της δυναμικής πορείας του αυτοκινήτου (με βάση την ταχύτητα, την κατεύθυνση και τη γωνιακή ταχύτητα) με τη γεωμετρία του δρόμου (από τα στατικά δεδομένα του χάρτη) πραγματοποιείται σύμφωνα με τον ακόλουθο κανόνα: για την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη περισσότερο βάρος δίνεται στην δυναμική κατάσταση του αυτοκινήτου, ενώ για την μακροπρόθεσμη πρόβλεψη η γεωμετρία του δρόμου είναι πιο σημαντική (είναι δεδομένο ότι ο εκάστοτε οδηγός θα ακολουθήσει τη γεωμετρία του δρόμου). Ένα Dempster-Shafer σύστημα συλλογιστικής αποτελεί τη βάση για την εκτίμηση του ελιγμού του αυτοκινήτου. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί ως είσοδο διάφορες πηγές πληροφορίας, όπως η πλευρική απόσταση του αυτοκινήτου από τη λωρίδα, η μελλοντική πορεία, η θέση των άλλων αυτοκινήτων που περιβάλλουν το υποκείμενο αυτοκίνητο κλπ. Τέλος, για την εκτίμηση της πυκνότητας της κυκλοφορίας καθώς και για άλλα περιβαλλοντικά γεγονότα (π.χ. ανίχνευση ομίχλης), αξιοποιείται η προσέγγιση των δυναμικών Bayesian δικτύων. Η τυπική έξοδος της διαδικασίας ανάλυσης σε επίπεδο κατάστασης φαίνεται στον Πίνακα 4.

Έξοδος	Προέλευση	Ρυθμός
Μελλοντική τροχιά, συσχέτιση της θέσης με κάποια λωρίδα, τύπος ελιγμού, τιμές εμπιστοσύνης για όλα τα παραπάνω για το υποκείμενο αυτοκίνητο	Επεξεργασία σε επίπεδο αντικειμένου, στατικά δεδομένα του χάρτη	12.5 Hz
Μελλοντική τροχιά, συσχέτιση της θέσης με κάποια λωρίδα, τύπος ελιγμού, τιμές εμπιστοσύνης για όλα τα παραπάνω για όλα τα υπόλοιπα αυτοκίνητα	Επεξεργασία σε επίπεδο αντικειμένου, στατικά δεδομένα του χάρτη	12.5 Hz
Περιβαλλοντικά γεγονότα π.χ. περιοχή με ομίχλη/χαμηλή ορατότητα, τιμές εμπιστοσύνης	Μετεωρολογικά δεδομένα από την RSU μέσω VANET, κατάσταση αυτοκινήτου π.χ. φωτισμός, ρύθμιση υαλοκαθαριστήρων	0.1 Hz
Κατάσταση της κυκλοφορίας στα τμήματα του οδικού δικτύου, τιμές εμπιστοσύνης	Δεδομένα για την κυκλοφορία από την RSU μέσω VANET, κατάσταση αυτοκινήτου π.χ. ταχύτητα	0.1 Hz

Πίνακας 4: Τυπική έξοδος της ανάλυσης σε επίπεδο κατάστασης

Παροχή πληροφοριών

Σκοπός της διαδικασίας παροχής πληροφοριών είναι η μεταφορά και αποθήκευση στον LDM των δεδομένων που παράγονται από τη μονάδα σύντηξης. Τα δεδομένα αυτά μπορεί να προέρχονται είτε από τη διαδικασία διαβάσματος δεδομένων απευθείας είτε ύστερα από επεξεργασία τους από την διαδικασία ανάλυσης σε επίπεδο αντικειμένου και/ή κατάστασης. Η διαδικασία παροχής πληροφοριών στη βάση είναι η μόνη διαδικασία που μπορεί να αποθηκεύσει δεδομένα στη βάση και χρησιμεύει σαν φίλτρο των δεδομένων που θα αποθηκευτούν σε αυτή.

2.2.3 Ασύρματη Επικοινωνία

Το σύστημα της ασύρματης επικοινωνίας του δικτύου των αυτοκινήτων περιλαμβάνει δύο κυρίως λειτουργίες: τη δημιουργία μηνυμάτων και τη δρομολόγηση αυτών.

Δημιουργία μηνυμάτων

Αρχικά, το σύστημα δημιουργίας μηνυμάτων παρακολουθεί τον LDM μέσω μιας διεπαφής ερωτημάτων (Q-API) και αναζητά δεδομένα τα οποία μπορεί να είναι χρήσιμα για απομακρυσμένες εφαρμογές (που δεν τρέχουν στον host). Στη συνέχεια περνάει τα σχετικά μηνύματα στον δρομολογητή, που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία μέσω του VANET, ο οποίος με τη σειρά του τα προωθεί σε άλλα

αυτοκίνητα ή στην υποδομή. Το σύστημα δημιουργίας μηνυμάτων καθορίζει ποια μηνύματα θα πρέπει να εκπεμφθούν μέσω του VANET με βάση ένα σύνολο κανόνων, οι οποίοι ορίζονται εκ των προτέρων από τις εφαρμογές. Αξιολογεί, επίσης, το περιεχόμενο των εισερχόμενων μηνυμάτων για να ελέγξει τη σημασία τους για την εκ νέου μετάδοση μέσω του VANET (π.χ. multihop επικοινωνία).

Τα μηνύματα που διακινούνται στο VANET περιορίζονται από ορισμένους κανόνες:

- Το σύστημα δημιουργίας μηνυμάτων είναι σε θέση να παράγει περιοδικά μηνύματα, μηνύματα με την παρουσία κάποιου γεγονότος, ή μηνύματα δικτύου (περιοδικά και κατ' αίτηση).
- Είναι δυνατόν να ρυθμιστεί η προτεραιότητα του μηνύματος για να εξασφαλιστεί μια σχεδόν άμεση μετάδοση κάποιου συγκεκριμένου μηνύματος και επίσης να διασφαλιστεί μια ομαλή περιοδική μετάδοση κάποιου άλλου μηνύματος.

Οι περισσότεροι από τους περιορισμούς καθορίζονται από τους μηχανισμούς ελέγχου της συμφόρησης, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.

Μήνυμα	Περιορισμοί και Ιδιότητες
Μήνυμα συμβάντος	Περιορισμένος αριθμός μηνυμάτων ανά χρονικό διάστημα Μικρή καθυστέρηση
Μήνυμα δικτύου	Περιορισμένο μέγεθος φορτίου Καθυστέρηση αντιστοιχη με αυτή των περιοδικών μηνυμάτων
Περιοδικό μήνυμα (χαμηλός ρυθμός)	Κανένα πρόβλημα
Περιοδικό μήνυμα (υψηλός ρυθμός)	Περιορισμένη ισχύς μετάδοσης Περιορισμένος αριθμός μηνυμάτων Μόνο ενός hop μετάδοση

Πίνακας 5: Περιορισμοί για τη δημιουργία μηνυμάτων

Δρομολόγηση μηνυμάτων

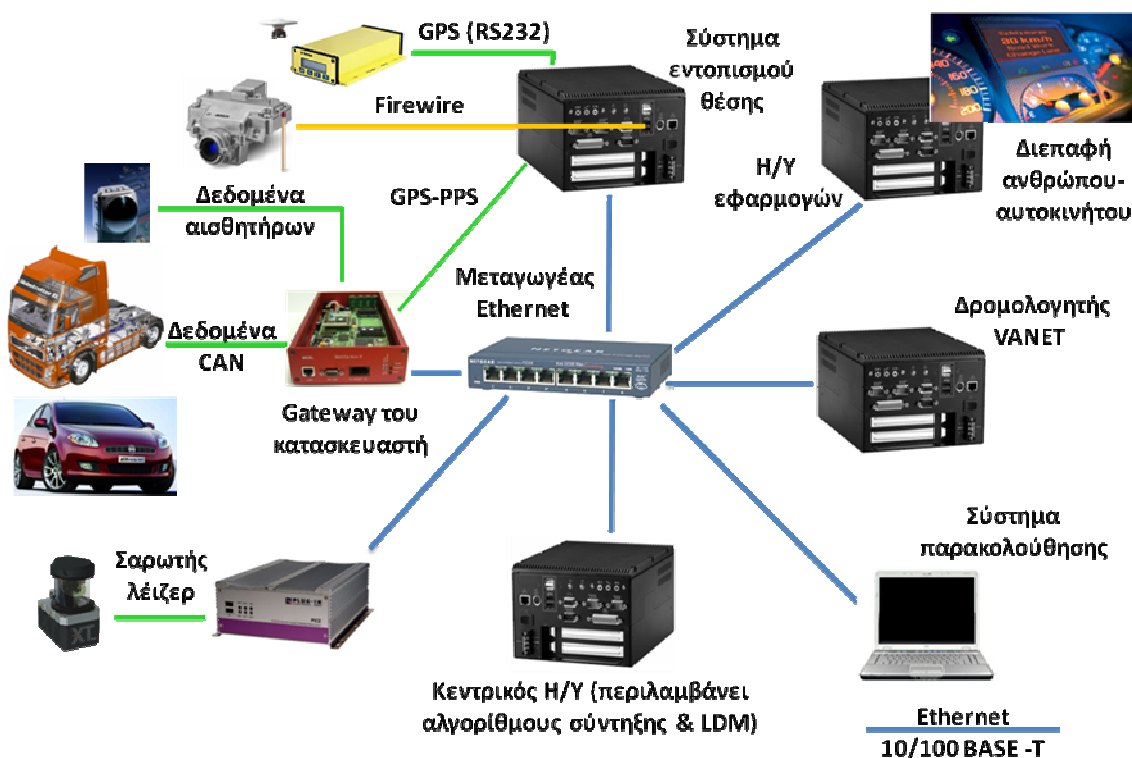
Το σύστημα δρομολόγησης ασχολείται με μηνύματα από και προς το VANET καθώς και μηνύματα που κατευθύνονται από τον διαχειριστή μηνυμάτων στο VANET. Τα εισερχόμενα μηνύματα μπορούν να διαχειρίζονται με τους ακόλουθους τρεις τρόπους:

- 1) απλώς αγνοούνται (επειδή δεν έχουν σημασία),
- 2) κατευθύνονται προς το σύστημα σύντηξης δεδομένων επειδή είναι χρήσιμα, ή
- 3) αποστέλλονται προς το διαχειριστή μηνυμάτων για αξιολόγηση της κατάστασης καθώς μπορεί να είναι χρήσιμα για άλλους.

Τα παραπάνω προϋποθέτουν ότι ένα μήνυμα που σχετίζεται με το VANET έχει «περιεχόμενο» και επιπλέον «βαθμό σχετικότητας». Το πώς ακριβώς λειτουργεί η συνάρτηση για το βαθμό σχετικότητας των μηνυμάτων καθώς και άλλες συναρτήσεις δεν αποτελεί αντικείμενο του παρόντος εγγράφου.

2.2.4 Μονάδα εντός του αυτοκινήτου

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται μια ενδεικτική υλοποίηση της μονάδας εντός του αυτοκινήτου, η οποία ταιριάζει με τις προδιαγραφές της γενικής αρχιτεκτονικής που περιγράφηκε παραπάνω, και η οποία δεν είναι δεσμευτική. Αυτή η υλοποίηση φαίνεται στην Εικόνα 17.



Εικόνα 17: Μονάδα εντός του αυτοκινήτου

Όπως είναι φανερό από την Εικόνα 17 η υλοποίηση στην πλευρά του δρόμου δεν θα χρησιμοποιεί σύστημα εντοπισμού θέσης καθώς και gateway για επικοινωνία με τον διαυλο CAN του αυτοκινήτου. Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην RSU μιας και μιλάμε για παρόμοια και συμμετρική αρχιτεκτονική σε κάθε κόμβο του συστήματος (OBU και RSU). Από την άλλη η υλοποίηση στην πλευρά του δρόμου μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση Οθόνης Μεταβλητών Μηνυμάτων (Variable Message Screen - VMS), συστατικό το οποίο δεν χρησιμοποιείται στην OBU.

Επειδή τα αυτοκίνητα είναι διαφορετικά, άλλα μπορούν να περιλαμβάνουν όλες τις μονάδες και άλλα ένα ελάχιστο σύνολο αυτών. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός φορτηγού υπάρχει αρκετός χώρος για εγκατάσταση όλων των υποσυστημάτων, ενώ στην περίπτωση μια μοτοσυκλέτας θα εγκατασταθεί το

ελάχιστο δυνατό σύνολο (σύστημα εντοπισμού θέσης και σύστημα ασύρματης επικοινωνίας) για να αποτελεί κόμβο του ασύρματου δικτύου.

Για να απλοποιηθεί η υλοποίηση και ολοκλήρωση του συστήματος, μπορεί να γίνει παράλληλη διαχείριση των διάφορων υποσυστημάτων. Μια τμηματική προσέγγιση της αρχιτεκτονικής υλικού επιτρέπει ανεξάρτητη ανάπτυξη, δηλαδή το λογισμικό επικοινωνίας, οι εφαρμογές, ο LDM και το σύστημα σύντηξης δεδομένων μπορούν να υλοποιηθούν σε διαφορετικές συσκευές.

Στη συνέχεια παρατίθεται μια λίστα με το απαραίτητο υλικό για τη μονάδα εντός του αυτοκινήτου καθώς και συνοπτική περιγραφή του καθενός:

- **Μεταγωγέας Ethernet**

Χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει την επικοινωνία μεταξύ των διαφορετικών Η/Υ και υποσυστημάτων της OBU μέσω Ethernet.

- **Δρομολογητής VANET**

Εξασφαλίζει την ασύρματη δικτύωση του κόμβου, το οποίο είναι το πιο βασικό για την ανάπτυξη συνεργατικών εφαρμογών.

- **Κεντρικός Η/Υ**

Αποτελεί το στοιχείο πυρήνα του συστήματος καθώς περιέχει τους αλγορίθμους σύντηξης και τον LDM. Είναι ο κεντρικός Η/Υ ο οποίος διασυνδέεται με όλα τα υποσυστήματα του δικτύου του αυτοκινήτου.

- **Η/Υ εφαρμογών**

Ο υπολογιστής αυτός τρέχει χωριστά τις διάφορες εφαρμογές. Θα μπορούσαν να ενσωματωθούν και στον κεντρικό Η/Υ.

- **Gateway του κατασκευαστή**

Αποτελεί το σημείο πρόσβασης του συστήματος για τα δεδομένα από τον διάλογο CAN του αυτοκινήτου και τα δεδομένα από τους αισθητήρες αντίληψης του οδικού περιβάλλοντος.

- **Σύστημα εντοπισμού θέσης**

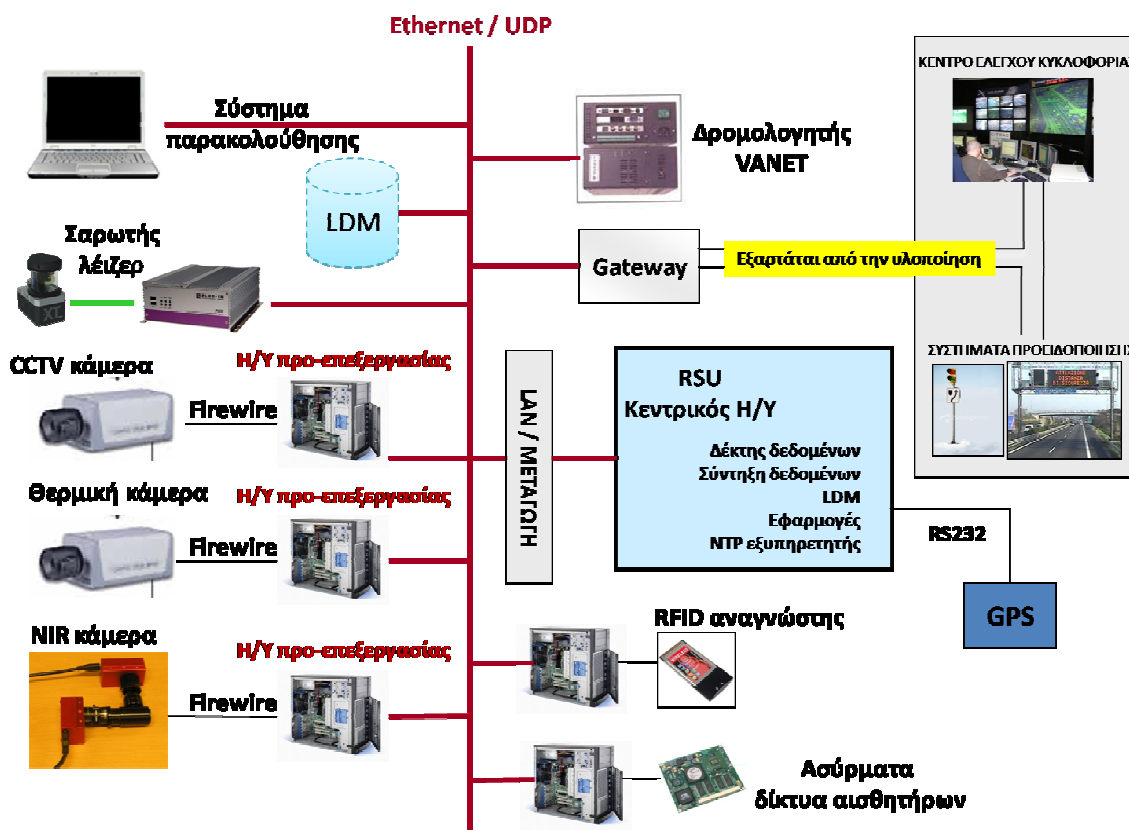
Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της ακρίβειας της θέσης του αυτοκινήτου σε σύγκριση με το συμβατικό GPS δέκτη. Διάφορες τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να συνδυαστούν, όπως UWB και επεξεργασία εικόνας (σε συνδυασμό με λεπτομερείς ψηφιακούς χάρτες). Επίσης, περιλαμβάνει και τον εξυπηρετητή του Network Time Protocol (NTP) για το συγχρονισμό ολόκληρου του συστήματος από το χρονικό στίγμα του GPS.

- **Σύστημα παρακολούθησης**

Αποτελεί ένα υποσύστημα παρακολούθησης το οποίο ελέγχει την αξιοπιστία ολόκληρου του συστήματος. Περιλαμβάνει ένα σύνολο εργαλείων για διάγνωση της κατάστασης και των δεδομένων που ανταλλάσσονται σε ολόκληρο το σύστημα εντός του αυτοκινήτου.

2.2.5 Μονάδα στην πλευρά του δρόμου

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζεται ένα παράδειγμα υλοποίησης της μονάδας στην πλευρά του δρόμου, η οποία πληροί τις προδιαγραφές της αρχιτεκτονικής αναφοράς που περιγράφηκε παραπάνω, και η οποία δεν είναι δεσμευτική. Αυτή η υλοποίηση φαίνεται στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18: Μονάδα στην πλευρά του δρόμου

Όπως είναι φανερό οι διαφοροποιήσεις με την μονάδα εντός του αυτοκινητόδρομου αφορούν το διαφορετικό τύπο αισθητήρων (κυριαρχούν οι κάμερες και οι σαρωτές λέιζερ, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και οι αναγνώστες RFID), τον προαιρετικό εξωτερικό LDM (εκτός από αυτόν στον κεντρικό Η/Υ), και τη σύνδεση με τα κέντρα ελέγχου κυκλοφορίας και προειδοποίησης.

Η υλοποίηση, οι αισθητήρες και το αντίστοιχο υλικό που είναι εγκατεστημένο στη μονάδα στην πλευρά του δρόμου μπορεί να διαφοροποιείται από περιοχή σε περιοχή. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα περιοχών και οι αντίστοιχες ανάγκες αυτών:

- Αυτοκινητόδρομοι

Στην περίπτωση των αυτοκινητοδρόμων η διαχείριση των πληροφοριών δεν γίνεται τοπικά, καθώς οι ενέργειες που πρέπει να γίνουν αποφασίζονται κεντρικά από το κέντρο ελέγχου του αυτοκινητόδρομου. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να ληφθούν υπόψη τμήματα του οδικού δικτύου με μήκος αρκετές εκατοντάδες χιλιόμετρα. Με τη σειρά του αυτό σημαίνει ότι ο LDM είναι

εγκατεστημένος στο κέντρο ελέγχου ενώ οι μονάδες στην πλευρά του δρόμου χρησιμοποιούνται για τη συλλογή των δεδομένων από τους αισθητήρες καθώς και για τη δρομολόγηση των μηνυμάτων από το VANET. Η λειτουργική αρχιτεκτονική είναι η ίδια με αυτή που περιγράφηκε παραπάνω και το μόνο που αλλάζει είναι η φυσική υλοποίηση εξαιτίας των λόγων που αναφέρθηκαν εδώ.

- **Αστικές περιοχές**

Σε αυτό το περιβάλλον η κύρια εφαρμογή που σχετίζεται με την υποδομή είναι η πρόληψη των συγκρούσεων στις διασταυρώσεις. Αυτό σημαίνει ότι το μέγεθος της περιοχής που γίνεται κάποιο συμβάν είναι περιορισμένο, σε αντίθεση με την περίπτωση των αυτοκινητοδρόμων. Επομένως όλα τα υποσυστήματα μπορεί να είναι τοποθετημένα σε μία RSU η οποία μπορεί να περιλαμβάνει τα εξής:

- τον LDM ο οποίος ενημερώνεται συνεχώς από τα δεδομένα που προέρχονται από τα αυτοκίνητα, τους φωτεινούς σηματοδότες και τους αισθητήρες του δρόμου,
- την επεξεργασία και την σύντηξη των δεδομένων,
- τις εφαρμογές που στέλνουν μηνύματα στα αυτοκίνητα και ενεργοποιούν τους φωτεινούς σηματοδότες,
- τη δημιουργία των μηνυμάτων και τη δρομολόγηση,
- τον εξοπλισμό για την ασύρματη επικοινωνία.

- **Αγροτικές περιοχές**

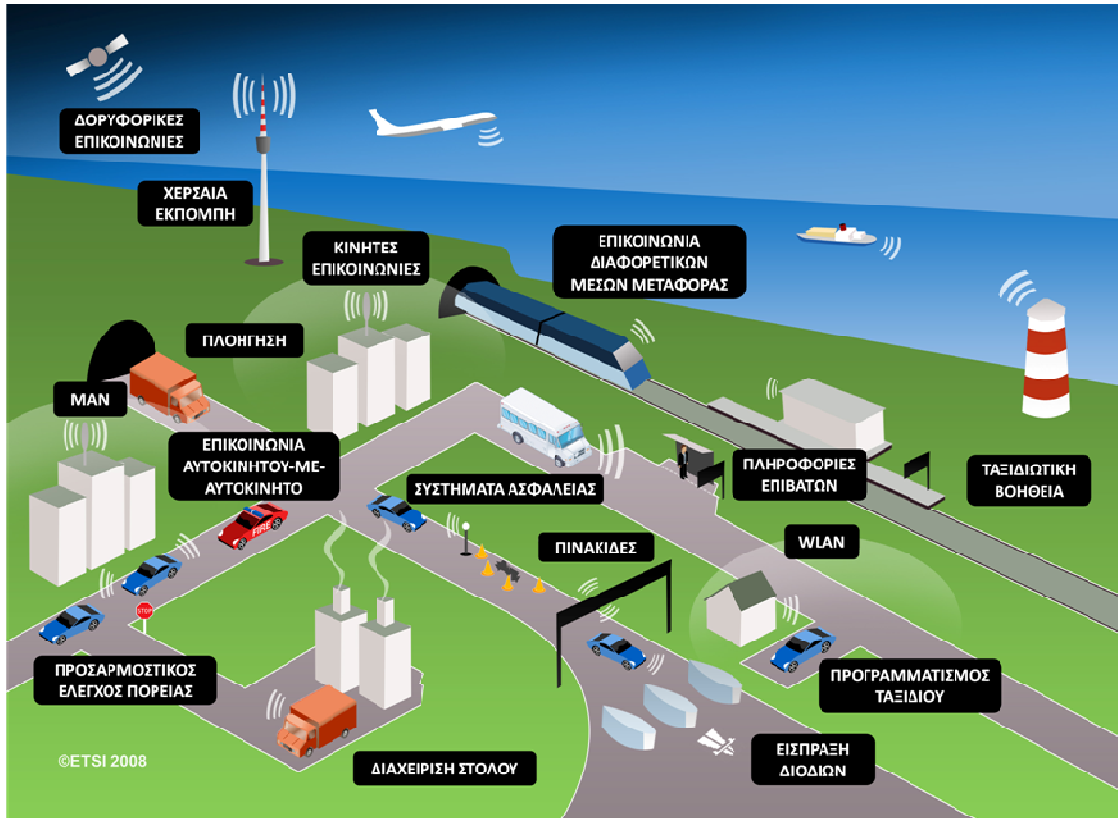
Στο περιβάλλον αυτό, οι εφαρμογές απαιτούν από την υποδομή ο LDM να καλύπτει μήκος δρόμου της τάξεως του 1 km για την εκτέλεση των απαιτούμενων υπολογισμών για τους κινδύνους με τους οποίους έρχονται αντιμέτωποι οι οδηγοί π.χ. επικίνδυνη προσπέραση, κακές συνθήκες ορατότητας κλπ. Σαν συνέπεια, ο LDM, η επεξεργασία και η σύντηξη των δεδομένων, η δημιουργία των μηνυμάτων και οι εφαρμογές βρίσκονται σε ένα μέρος, την κύρια RSU. Δευτερεύουσες RSUs τοποθετούνται κατά μήκος του τμήματος δρόμου που έχει ενδιαφέρον με σκοπό την ανάκτηση δεδομένων από τους αισθητήρες του δρόμου και τη διατήρηση της σύνδεσης μεταξύ των αυτοκινήτων και της κύριας RSU.

2.3 Εφαρμογές και σενάρια

Η ασύρματη δικτύωση μεταξύ αυτοκινήτων και μεταξύ αυτοκινήτων και σταθμών βάσης καθιστά δυνατή την πραγματοποίηση μιας μεγάλης ποικιλίας εφαρμογών και σεναρίων με σκοπό την βελτίωση της οδικής ασφάλειας, της αποδοτικότητας της κυκλοφορίας καθώς και την ενημέρωση ή την ψυχαγωγία του οδηγού και των επιβατών [35,59]. Στην Εικόνα 19 φαίνεται η μεγάλη ποικιλία των εφαρμογών που κάνουν χρήση της ασύρματης τεχνολογίας στα συστήματα μεταφορών. Η εικόνα αυτή αποτελεί μια μελλοντική αλλά όχι τόσο μακρινή εξέλιξη των συστημάτων αυτών.

Όπως αναφέρθηκε οι εφαρμογές του ασύρματου δικτύου των αυτοκινήτων χωρίζονται σε τρεις κυρίως κατηγορίες, οι οποίες θα αναλυθούν στις ακόλουθες παραγράφους:

- εφαρμογές που έχουν σχέση με την ασφάλεια,
- εφαρμογές σχετικές με την αποδοτικότητα της κυκλοφορίας και
- εφαρμογές ψυχαγωγίας και πληροφόρησης του οδηγού/των επιβατών.



Εικόνα 19: Εφαρμογές ασύρματης επικοινωνίας στα έξυπνα συστήματα μεταφορών

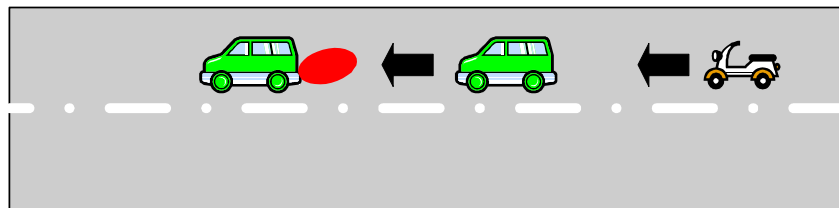
2.3.1 Εφαρμογές ασφάλειας

Ο πρωταρχικός στόχος των εφαρμογών ασφάλειας είναι η βελτίωση της ασφάλειας στους δρόμους. Ωστόσο, η βελτίωση της οδικής ασφάλειας έχει αναγνωριστεί ότι μπορεί να έχει δευτερεύοντα οφέλη τα οποία δεν σχετίζονται άμεσα με αυτή. Στη συνέχεια αυτής της παραγράφου αναφέρονται ενδεικτικά μερικές εφαρμογές.

Προειδοποίηση εμπρόσθιας σύγκρουσης

Οι εμπρόσθιες συγκρούσεις αποτελούν ένα πολύ σημαντικό ποσοστό των τροχαίων ατυχημάτων σε όλες τις περιοχές του κόσμου. Τυπικές αιτίες των συγκρούσεων αυτών είναι η απόσπαση της προσοχής του οδηγού, η απότομη πέδηση ενός προπορευόμενου αυτοκινήτου, η παρουσία ενός στατικού εμποδίου στην περιοχή μπροστά από το υποκείμενο αυτοκίνητο (για παράδειγμα έπειτα από μία στροφή) κλπ. Ένα τυπικό

σύστημα προειδοποίησης σύγκρουσης βασίζεται σε αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι στο υποκείμενο αυτοκίνητο. Οι αισθητήρες αυτοί μπορεί να είναι οι εξής: ένα ραντάρ μεγάλης εμβέλειας για προσαρμοστικό έλεγχο πλοήγησης, εμπρόσθιοι οπτικοί αισθητήρες για ανίχνευση αντικειμένων, κάμερες για τη νεκρή γωνία, σαρωτές λέιζερ για ανίχνευση αντικειμένων και κατηγοριοποίηση αυτών. Με αυτό τον τρόπο το υποκείμενο αυτοκίνητο μπορεί να ενημερωθεί για γεγονότα και στόχους που βρίσκονται εντός της εμβέλειας ανίχνευσης των αισθητήρων. Στην Εικόνα 20 φαίνεται μια εφαρμογή προειδοποίησης εμπρόσθιας σύγκρουσης στην οποία το προπορευόμενο αυτοκίνητο φρενάρει, ενώ άλλα αυτοκίνητα ακολουθούν.



Εικόνα 20: Εφαρμογή προειδοποίησης εμπρόσθιας σύγκρουσης

Η αξιοπιστία και η ακρίβεια ενός συστήματος προειδοποίησης σύγκρουσης στηρίζεται στον αριθμό και στο είδος των αισθητήρων καθώς και στο περιβάλλον γύρω από το αυτοκίνητο. Η παρεμπόδιση των αισθητήρων από αντικείμενα του περιβάλλοντος, τα όρια της εμβέλειας των αισθητήρων καθώς και άλλοι φυσικοί περιορισμοί, μετριάζουν την εμβέλεια και υποβαθμίζουν την επίδοση του συστήματος. Εκτός από τους παραπάνω παράγοντες, ένα σύστημα προειδοποίησης σύγκρουσης για να λειτουργήσει σωστά χρειάζεται μια πληθώρα αισθητήρων για να καλύψει όλη την περιοχή γύρω από το αυτοκίνητο, γεγονός που κάνει ένα τέτοιο σύστημα εξαιρετικά ακριβό.

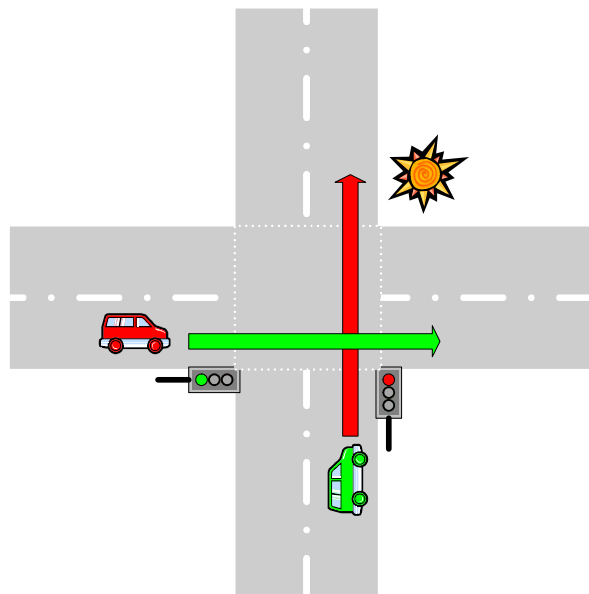
Το σύστημα προειδοποίησης σύγκρουσης μπορεί να είναι πολύ πιο αποτελεσματικό αν άλλα γειτονικά αυτοκίνητα επικοινωνούν με το υποκείμενο αυτοκίνητο, διευρύνοντας με αυτόν τον τρόπο τον ηλεκτρονικό ορίζοντα του οδηγού σε σχέση με τον περιορισμένο ορίζοντα των αισθητήρων του αυτοκινήτου. Στην ουσία αυτό αποτελεί την αρχή των συνεργατικών συστημάτων προειδοποίησης σύγκρουσης. Κατά τη διάρκεια της οδήγησης, εξοπλισμένα αυτοκίνητα μοιράζονται ανώνυμα τις σχετικές πληροφορίες, όπως θέση, ταχύτητα και κατεύθυνση. Με τον τρόπο αυτό κάθε αυτοκίνητο παρακολουθεί τις ενέργειες των οδηγών και τη θέση και συμπεριφορά όλων των αυτοκινήτων. Όταν το αυτοκίνητο εντοπίζει μια κρίσιμη κατάσταση, το σύστημα προειδοποιεί τον οδηγό με οπτικό, ακουστικό, ή/και απτικό τρόπο. Έτσι, ο οδηγός έχει αρκετό χρόνο για να παρέμβει και να αποφύγει τη σύγκρουση.

Σε κρίσιμες καταστάσεις, η αυξημένη αξιοπιστία και εμπιστοσύνη του συστήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άμεση παρέμβαση ώστε να αποφευχθεί η σύγκρουση, γεγονός το οποίο χωρίς τη χρήση επικοινωνίας δεν θα ήταν δυνατό εξαιτίας της καθυστέρησης στην ανίχνευση και κατηγοριοποίηση των αντικειμένων και των καταστάσεων. Η συνεργατική προσέγγιση έχει επίσης μεγάλη επιρροή και στην κατηγοριοποίηση των αντικειμένων. Αν τα αυτοκίνητα είναι εξοπλισμένα με ασύρματη επικοινωνία ανταλλάσσουν απευθείας πληροφορίες σχετικά με τον τύπο τους (π.χ. φορτηγό, επιβατικό, μηχανάκι).

Ασφάλεια στις διασταυρώσεις

Ένας μεγάλος αριθμός ατυχημάτων σε αστικό περιβάλλον συμβαίνουν στις διασταυρώσεις. Το γεγονός αυτό εξηγείται από το σημαντικό φόρτο του οδηγού που προέρχεται από τις περίπλοκες καταστάσεις που μπορεί να εμφανιστούν στις διασταυρώσεις και οι οποίες οφείλονται στα πολλά αυτοκίνητα που κατακλύζουν τις διασταυρώσεις, στους πολλούς διαφορετικούς χρήστες (επιβατικά, φορτηγά, πεζοί, δικυκλιστές κλπ.), στα κτίρια και τους τοίχους που περιορίζουν την ορατότητα του οδηγού κλπ.

Υποτίθεται ότι για να συμβεί κάποιο ατύχημα ή μια επικίνδυνη κατάσταση πρέπει να υπάρχει παραβίαση των κανόνων οδικής κυκλοφορίας π.χ. παραβίαση φωτεινού σηματοδότη ή παραβίαση πινακίδας “STOP”. Αλλά οι διασταυρώσεις είναι περίπλοκες και υπάρχει πιθανότητα να προκληθούν ατυχήματα ακόμα και λόγω της υπακοής στους κανόνες οδικής συμπεριφοράς π.χ. το απότομο φρενάρισμα αν ο φωτεινός σηματοδότης αλλάξει από πράσινο σε κόκκινο. Ένα απλοϊκό παράδειγμα εφαρμογής ασφάλειας σε διασταύρωση φαίνεται στην Εικόνα 21.

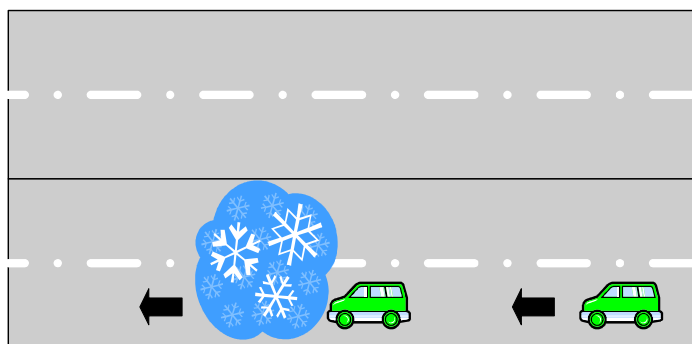


Εικόνα 21: Εφαρμογή ασφάλειας σε διασταύρωση

Στην περίπτωση εκμετάλλευσης της ασύρματης επικοινωνίας για την ασφάλεια στις διασταυρώσεις τα οφέλη είναι εμφανή. Καταρχήν, οι φωτεινοί σηματοδότες και οι άλλες πινακίδες κυκλοφορίας μπορούν να εκπέμπουν την κατάσταση τους καθώς και το πότε πρόκειται να αλλάξουν κατάσταση (π.χ. από κόκκινο σε πράσινο) στους γύρω οδηγούς, ενημερώνοντάς τους για την πραγματική κατάσταση στη διασταύρωση. Επιπρόσθετα, τα αυτοκίνητα μπορούν να εκπέμπουν τη θέση τους και την δυναμική τους κατάσταση (ταχύτητα, επιτάχυνση, γωνία στροφής) και έτσι να ενημερώνουν τους γύρω οδηγούς για την παρουσία τους. Σε διαφορετική περίπτωση θα ήταν αδύνατο οι άλλοι οδηγοί να γνωρίζουν την παρουσία τους εξαιτίας των κτιρίων, των τοίχων και άλλων εμποδίων. Τέλος, μπορούν να εγκατασταθούν κάποιοι αισθητήρες (π.χ. σαρωτές λέιζερ) σε κρίσιμα σημεία σε μια διασταύρωση για ανίχνευση πεζών και δικυκλιστών (ευάλωτων χρηστών) και ενημέρωση των οδηγών για την παρουσία τους μέσω της ασύρματης επικοινωνίας.

Προειδοποίηση επικινδυνότητας τμήματος του οδοστρώματος

Η εφαρμογή αυτή αφορά την ενημέρωση του οδηγού σχετικά με την κατάσταση ενός τμήματος του οδοστρώματος στο οποίο υπάρχει κάποιος κίνδυνος. Ο κίνδυνος αυτός αφορά κυρίως την ολισθηρότητα του οδοστρώματος που μπορεί να οφείλεται στις επικρατούσες καιρικές συνθήκες (π.χ. πάγος, βροχή) ή σε κάποιο έκτακτο γεγονός (π.χ. διαρροή λαδιού ενός προπορευόμενου αυτοκινήτου). Η ανίχνευση του ολισθηρού οδοστρώματος μπορεί να γίνει είτε άμεσα από κάποιο αυτοκίνητο με τη χρήση συγκεκριμένων αισθητήρων είτε έμμεσα με την ενεργοποίηση του ABS ή του ESP. Στη συνέχεια οι πληροφορίες αυτές μπορεί να χρησιμοποιηθούν για ενημέρωση του οδηγού για την επικινδυνότητα του δρόμου, αλλά ίσως είναι πολύ αργά για να αναλάβει δράση γιατί υπάρχει μεγάλη πιθανότητα το αυτοκίνητο να έχει γλιστρήσει ήδη έχοντας ενεργοποιηθεί για παράδειγμα το ESP. Μια εφαρμογή προειδοποίησης για την κατάσταση του οδοστρώματος φαίνεται στην Εικόνα 22.



Εικόνα 22: Εφαρμογή προειδοποίησης επικινδυνότητας τμήματος του οδοστρώματος

Όπως έγινε φανερό παραπάνω, η εφαρμογή αυτή δεν έχει σχεδόν κανένα ενδιαφέρον χωρίς τη χρήση ασύρματης επικοινωνίας. Με την εκμετάλλευση της ασύρματης επικοινωνίας το δίκτυο των αυτοκινήτων μπορεί να μοιράζεται πληροφορίες που σχετίζονται με επικίνδυνα τμήματα του οδικού δικτύου π.χ. ολισθηρό οδόστρωμα. Για παράδειγμα, ένα αυτοκίνητο που αντιλαμβάνεται την ενεργοποίηση του ESP συστήματος, σχετίζει τα δεδομένα αυτά με την τοποθεσία και τα ανακοινώνει στα άλλα αυτοκίνητα στη γύρω περιοχή και σε κάποια πιθανή RSU. Τα υπόλοιπα αυτοκίνητα που λαμβάνουν αυτή την πληροφορία ενημερώνουν εγκαίρως τους οδηγούς τους για τον πιθανό κίνδυνο, ενώ ταυτόχρονα μοιράζονται την πληροφορία αυτή με άλλα γειτονικά αυτοκίνητα. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα κάποιοι ειδικοί αισθητήρες που είναι συνδεδεμένοι στην μονάδα στην πλευρά του δρόμου να μπορούν να ανιχνεύσουν την επικινδυνότητα και να ενημερώσουν τους οδηγούς που πλησιάζουν την περιοχή.

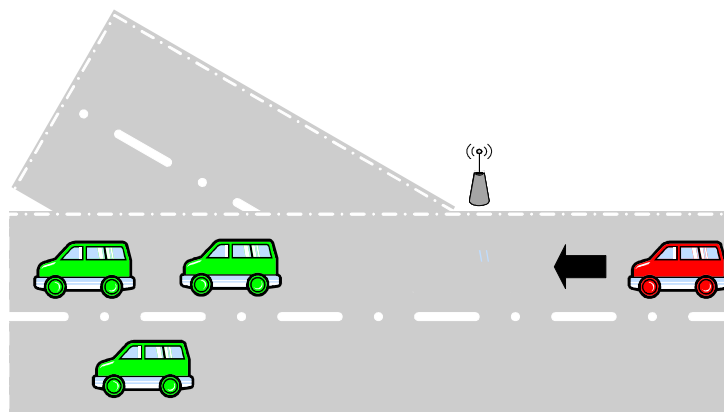
Συμπερασματικά, το εμφανές πλεονέκτημα από την χρήση του ασύρματου δικτύου είναι η μετάδοση της πληροφορίας που αφορά την κατάσταση του οδοστρώματος στους οδηγούς που πλησιάζουν ώστε να έχουν τον απαιτούμενο χρόνο να αντιδράσουν. Με τη συνεργατική αυτή προσέγγιση υπάρχει η δυνατότητα να μεταφερθούν αυτές οι πληροφορίες σε κέντρα ελέγχου στην πλευρά του δρόμου, να αναλυθούν και να ελεγχθούν για την ορθότητα και την ποιότητά τους και να μεταδοθούν σε άλλα αυτοκίνητα που κινούνται στο συγκεκριμένο τμήμα του δρόμου.

2.3.2 Εφαρμογές αποδοτικότητας της κυκλοφορίας

Ο πρωταρχικός στόχος των εφαρμογών για την διαχείριση της κυκλοφορίας είναι η βελτίωση της ροής της. Ωστόσο, η βελτίωση της διαχείρισης της κυκλοφορίας έχει αναγνωριστεί ότι μπορεί να έχει δευτερεύοντα οφέλη τα οποία δεν σχετίζονται με τη διαχείριση της κυκλοφορίας.

Εμπλουτισμένη καθοδήγηση διαδρομής και πλοήγηση

Στην εφαρμογή αυτή η υποδομή συλλέγει συνεχώς πληροφορίες που σχετίζονται με την πυκνότητα της κυκλοφορίας και κάνει και μια πρόβλεψη για τμήματα με κυκλοφοριακή συμφόρηση σε μία μεγάλη περιοχή. Στη συνέχεια όταν κάποιο εξοπλισμένο αυτοκίνητο περάσει δίπλα από μία RSU οι πληροφορίες αυτές για την κατάσταση της κυκλοφορίας στην γύρω περιοχή (ή μόνο στο τμήμα του δρόμου που βρίσκεται το αυτοκίνητο) καθώς και οδηγίες πλοήγησης παρέχονται σε αυτό το αυτοκίνητο. Οι πληροφορίες αυτές επεξεργάζονται από το αυτοκίνητο και έπειτα ενημερώνεται ο οδηγός για πιθανές καθυστερήσεις ή εναλλακτικές διαδρομές που ίσως υπάρχουν λόγω των συνθηκών κυκλοφορίας. Με τον τρόπο αυτό είναι πολύ πιθανό να καθοδηγηθεί ένας σημαντικός αριθμός οδηγών γύρω από μποτιλιαρισμένες περιοχές με αποτέλεσμα ολόκληρο το σύστημα μεταφορών να γίνει πιο αποδοτικό με τη χρήση εναλλακτικών διαδρομών. Παράπλευρο αποτέλεσμα θα είναι και η μείωση της εκπομπής ρύπων, που προέρχονται από την πολύωρη αναμονή σε μποτιλιαρισμένες οδικές αρτηρίες.

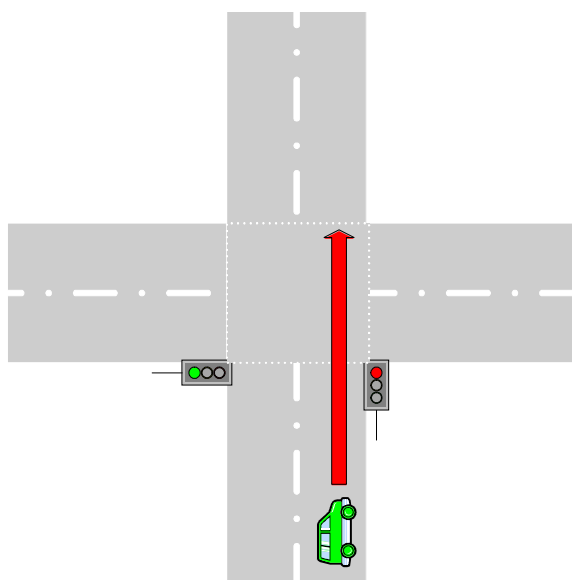


Εικόνα 23: Εφαρμογή εμπλουτισμένης καθοδήγησης και πλοήγησης

Στην Εικόνα 23 φαίνεται ένα σενάριο ενισχυμένης καθοδήγησης κατά το οποίο με τη βοήθεια της RSU ο οδηγός του υποκείμενου αυτοκινήτου (κόκκινο αυτοκίνητο) ενημερώνεται ότι για να φτάσει πιο γρήγορα στον προορισμό του πρέπει να ακολουθήσει κάποια παράκαμψη καθώς υπάρχει πολύ πυκνή κυκλοφορία αν συνεχίσει ευθεία. Όπως είναι φανερό από την περιγραφή της εφαρμογής αυτής για την υλοποίησή της είναι απαραίτητη η ύπαρξη ασύρματης επικοινωνίας με σταθμό βάσης για την παροχή των απαραίτητων πληροφοριών. Ένα αυτοκίνητο που θα ήταν εξοπλισμένο μόνο με κάποιους αισθητήρες αντίληψης θα μπορούσε με κάποιους έξυπνους αλγορίθμους να υπολογίσει την πυκνότητα της κίνησης μόνο στο τμήμα του δρόμου που κινείται χωρίς πληροφορίες για εναλλακτικές διαδρομές.

Συμβουλή βέλτιστης ταχύτητας μέχρι το φωτεινό σηματοδότη

Η εφαρμογή αυτή παρέχει πληροφορίες στον οδηγό σε μια προσπάθεια να κάνει την οδήγηση πιο ομαλή και να αποφύγει τις στάσεις. Καθώς το αυτοκίνητο πλησιάζει σε μια διασταύρωση με φωτεινούς σηματοδότες λαμβάνει πληροφορίες σχετικά με την ακριβή θέση της διασταύρωσης και τη διάρκεια του τρέχοντος σήματος (π.χ. ο αριθμός των δευτερολέπτων για να αλλάξει το φανάρι από πράσινο σε κόκκινο).



Εικόνα 24: Εφαρμογή βέλτιστης ταχύτητας μέχρι το φωτεινό σηματοδότη

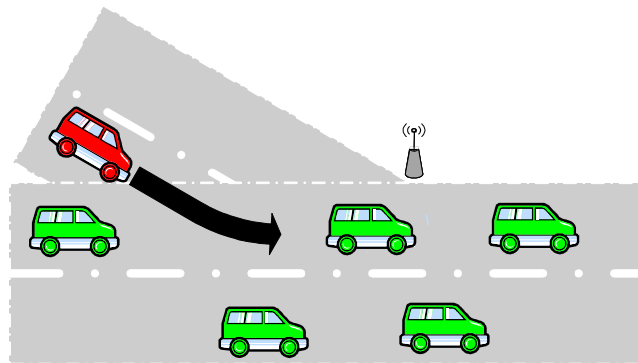
Με βάση αυτή την πληροφορία, το αυτοκίνητο υπολογίζει τη βέλτιστη ταχύτητα χρησιμοποιώντας την απόσταση από τη διασταύρωση και το χρονικό διάστημα μέχρι το φανάρι να γίνει πράσινο. Στη συνέχεια ενημερώνει τον οδηγό για τη βέλτιστη αυτή ταχύτητα, την οποία αν ακολουθήσει είναι πολύ πιθανό ο φωτεινός σηματοδότης να γίνει πράσινος χωρίς να χρειαστεί να σταματήσει το αυτοκίνητο. Οι λιγότερες στάσεις έχουν σαν αποτέλεσμα την αυξημένη ροή της κυκλοφορίας και την εξοικονόμηση καυσίμων για τα εξοπλισμένα αυτοκίνητα.

Στην Εικόνα 24 φαίνεται ένα παράδειγμα της εφαρμογής κατά το οποίο ο οδηγός ακολουθεί την συμβουλή βέλτιστης ταχύτητας και έτσι δεν θα χρειαστεί να σταματήσει στη διασταύρωση αλλά μόλις πλησιάσει το φωτεινό σηματοδότη αυτός θα γίνει πράσινος. Για την πραγματοποίηση μιας τέτοιας εφαρμογής είναι απαραίτητη η ύπαρξη διαθέσιμης ασύρματης τεχνολογίας για την επικοινωνία της κατάστασης του φωτεινού σηματοδότη.

Υποστήριξη συγχώνευσης κυκλοφορίας

Η εφαρμογή υποστήριξης συγχώνευσης κυκλοφορίας επιτρέπει τη συγχώνευση των αυτοκινήτων σε μια κοινή ροή κυκλοφορίας, χωρίς την ανάγκη για διακοπή της ομαλής ροής τους. Όταν ένα αυτοκίνητο εισέρχεται σε κάποιο αυτοκινητόδρομο από μια είσοδο επικοινωνεί την πρόθεσή του αυτή στα γειτονικά

αυτοκίνητα. Το αυτοκίνητο που εισέρχεται στον αυτοκινητόδρομο απαιτεί συγκεκριμένους ελιγμούς από τους γύρω του ώστε να του επιτραπεί μια ασφαλής και μη διακοπτόμενη συγχώνευση στην κυκλοφορία. Αν δεν υπάρχουν αντιρρήσεις από τους άλλους οδηγούς, τότε είτε η κυκλοφορία θα προσαρμοστεί αυτόματα είτε θα δοθούν συμβουλές στους οδηγούς για το πώς να δράσουν. Με αυτό τον τρόπο το εισερχόμενο αυτοκίνητο μπορεί να εισέλθει ομαλά στην ροή της κυκλοφορίας χωρίς να προκαλέσει σημαντικές διασπάσεις σε αυτή. Η εφαρμογή αυτή μπορεί να ενισχυθεί με τη χρήση ενός σταθμού βάσης ο οποίος μπορεί να πάρει τις αποφάσεις για τις κινήσεις του κάθε συμμετέχοντα.



Εικόνα 25: Εφαρμογή υποστηρίξις συγχώνευσης κυκλοφορίας

Η εφαρμογή αυτή για να πραγματοποιηθεί, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 25, απαιτεί ένας μεγάλος αριθμός αυτοκινήτων να είναι εξοπλισμένα με ασύρματο δίκτυο. Επιπλέον, αποτελεί μία από τις πιο δύσκολες και πολύπλοκες εφαρμογές που βασίζονται στην αρμονική συνεργασία μεταξύ των αυτοκινήτων και πρέπει να υπάρχει πλήρης εμπιστοσύνη στις πληροφορίες που ανταλλάσσονται μεταξύ τους.

2.3.3 Εφαρμογές ψυχαγωγίας, πληροφόρησης και λοιπές εφαρμογές

Στην ουσία πρόκειται για εφαρμογές που ασχολούνται με τη διαφήμιση και παροχή πληροφοριών κατ' αίτηση σε διερχόμενα αυτοκίνητα είτε σε εμπορική είτε σε μη εμπορική βάση. Οι υπηρεσίες αυτές αφορούν κυρίως την ψυχαγωγία και την ενημέρωση του οδηγού και των άλλων επιβατών στο εκάστοτε αυτοκίνητο. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι αυτές οι εφαρμογές κάνουν χρήση της ασύρματης επικοινωνίας των αυτοκινήτων με την υποδομή και δεν θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν με άλλο τρόπο. Αποτελούν δηλαδή καινούργιες εφαρμογές οι οποίες αναπτύχθηκαν έπειτα από την είσοδο της ασύρματης τεχνολογίας στον τομέα των αυτοκινήτων και δεν γίνεται να υλοποιηθούν απλά μόνο με τη χρήση προηγμένων συστημάτων αισθητήρων που είναι εγκατεστημένα στο αυτοκίνητο.

Ενημέρωση για μέρη ενδιαφέροντος

Η εφαρμογή γνωστοποίησης των σημείων ενδιαφέροντος επιτρέπει στις τοπικές επιχειρήσεις, τα τουριστικά αξιοθέατα, ή άλλα σημεία ενδιαφέροντος να διαφημίζουν τη διαθεσιμότητά τους στα κοντινά

αυτοκίνητα. Στην περίπτωση αυτή, μια μονάδα στην πλευρά του δρόμου εκπέμπει πληροφορίες σχετικά με ένα σημείο ενδιαφέροντος, όπως η τοποθεσία του, οι ώρες λειτουργίας του και η τιμολόγηση. Ο τεράστιος όγκος των πληροφοριών αυτών φιλτράρεται από τα αυτοκίνητα με δυναμικό τρόπο, ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση, και οι κατάλληλες πληροφορίες παρουσιάζονται στον οδηγό. Για παράδειγμα, αν η στάθμη των καυσίμων είναι χαμηλή, το αυτοκίνητο θα μπορούσε να δείξει στον οδηγό τις τοποθεσίες και τις τιμές των πρατηρίων βενζίνης στην γύρω περιοχή. Το όφελος αυτής της εφαρμογής είναι ότι η διαφήμιση καθίσταται περισσότερο αποτελεσματική καθώς ο οδηγός κινείται εντός της γεωγραφικής περιοχής και είναι πιο πιθανό να επισκεφθεί κάποιο μέρος απ' ό,τι αν το άκουγε σε έναν ραδιοφωνικό σταθμό ή το έβρισκε στο διαδίκτυο και βρισκόταν εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά. Επιπλέον, το όφελος για τους καταναλωτές είναι ενημερωμένες πληροφορίες από μια επιχείρηση στην γύρω περιοχή.

Πρόσβαση στο διαδίκτυο

Η εφαρμογή αυτή επιτρέπει στους οδηγούς και στους επιβάτες των αυτοκινήτων να έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο. Αυτό επιτρέπει τη χρήση όλων των ειδών των υπηρεσιών που βασίζονται στο IP πρωτόκολλο μέσα στο αυτοκίνητο. Ως εκ τούτου, μια διαδρομή πολλαπλών hops από μία RSU προς το ενδιαφερόμενο αυτοκίνητο εγκαθίσταται και διατηρείται ώστε να ενεργεί ως πύλη στο διαδίκτυο. Αυτή η διαδρομή των πολλαπλών hops πραγματοποιείται με διαφάνεια στα πάνω στρώματα της στοίβας του πρωτοκόλλου και επομένως δίνει τη δυνατότητα σχεδόν κάθε υπηρεσία που βασίζεται στο IP πρωτόκολλο να χρησιμοποιηθεί μέσα στα αυτοκίνητα. Τέλος, η εφαρμογή αυτή δίνει τη δυνατότητα πρόσβασης στον ενδιαφερόμενο σε οποιοδήποτε είδος πληροφοριών που διατίθενται στο διαδίκτυο (π.χ. κατέβασμα ενημερωμένων ψηφιακών χαρτών).

Απομακρυσμένη διάγνωση προβλήματος

Η εφαρμογή αυτή επιτρέπει σε ένα εξουσιοδοτημένο σταθμό τεχνικής βοήθειας να εκτιμήσει την κατάσταση του αυτοκινήτου χωρίς να χρειάζεται φυσική σύνδεση με αυτό. Όταν ένα αυτοκίνητο εισέρχεται στο χώρο στάθμευσης του κτιρίου της τεχνικής βοήθειας, το σύστημα της απομακρυσμένης διάγνωσης μπορεί να ζητήσει από το αυτοκίνητο τις διαγνωστικές πληροφορίες του ώστε να υποστηρίξει τη διάγνωση του προβλήματος που αναφέρθηκε από τον πελάτη. Επιπλέον, καθώς πλησιάζει το αυτοκίνητο το ιστορικό του και τα απαραίτητα στοιχεία του πελάτη μπορούν να ανακτηθούν από μια βάση δεδομένων και να είναι έτοιμα για χρήση από τον τεχνικό. Αν απαιτούνται ενημερώσεις λογισμικού, το σύστημα μπορεί να εγκαταστήσει τις ενημερωμένες εκδόσεις χωρίς φυσική σύνδεση. Η εφαρμογή αυτή μπορεί να μειώσει το ποσό του χρόνου που απαιτείται για την εξυπηρέτηση του πελάτη κατά τη διάρκεια μιας επίσκεψης σε ένα εξουσιοδοτημένο συνεργείο. Το γεγονός αυτό θα οδηγήσει επίσης σε μείωση του κόστους για την επισκευή και σε λιγότερο χρόνο αναμονής για τους πελάτες.

Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η αρχιτεκτονική αναφοράς του κάθε κόμβου του ασύρματου δικτύου των αυτοκινήτων και αναλύθηκαν τα βασικά τμήματά της. Η αρχιτεκτονική αυτή σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τις δραστηριότητες προτυποποίησης που εκτυλίσσονται στην Ευρώπη. Κεντρικά στοιχεία αυτής της αρχιτεκτονικής είναι ο τοπικός δυναμικός χάρτης και το σύστημα σύντηξης δεδομένων.

Ο τοπικός δυναμικός χάρτης είναι μια σχεσιακή βάση δεδομένων με διαστρωματωμένη αρχιτεκτονική, όπου οι διαφορετικές πληροφορίες βρίσκονται σε διαφορετικά στρώματα, και έχει ως στόχο την αναπαράσταση του οδικού περιβάλλοντος με τρόπο εύχρηστο για τις εφαρμογές. Το σύστημα σύντηξης δεδομένων αποτελεί τη βασική είσοδο στον τοπικό δυναμικό χάρτη και σκοπός του είναι ο συνδυασμός των πληροφοριών από διαφορετικές πηγές (αισθητήρες αυτοκινήτου, ασύρματα μηνύματα από άλλα αυτοκίνητα και σταθμούς βάσης κλπ.) με αξιόπιστο τρόπο, ώστε να παράγει τις πιο ενημερωμένες και έγκυρες πληροφορίες για τα άλλα αυτοκίνητα καθώς και για τις μελλοντικές προθέσεις τους.

Τέλος, στο παρόν κεφάλαιο έγινε μια κατηγοριοποίηση των εφαρμογών στα ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων σε εφαρμογές σχετιζόμενες με την ασφάλεια, την αποδοτικότητα της κυκλοφορίας και την ψυχαγωγία και δόθηκαν και κάποια παραδείγματα από κάθε κατηγορία. Στην παρούσα εργασία το ενδιαφέρον εστιάζεται στις εφαρμογές ασφάλειας.

ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε μια γενική επισκόπηση της αρχιτεκτονικής ενός δικτύου αυτοκινήτων, ενώ παρουσιάστηκαν και κάποιες εφαρμογές και σενάρια τέτοιων συστημάτων, δείχνοντας έτσι το ευρύ πεδίο εφαρμογών που ανοίγεται στον τομέα των ευφυών συστημάτων μεταφορών με τη χρήση ασύρματης δικτύωσης. Σε αυτό το κεφάλαιο, καθώς και στα επόμενα, εξετάζονται οι αλγόριθμοι σύντηξης δεδομένων από τις διάφορες πηγές πληροφορίας του συστήματος. Τα αποτελέσματα από τη σύντηξη δεδομένων μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για την πραγματοποίηση της πλειοψηφίας των εφαρμογών που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν οι τεχνικές και οι αλγόριθμοι για το φιλτράρισμα των δεδομένων σε επίπεδο αυτοκινήτου με τελικό στόχο οι πληροφορίες που εκπέμπει το κάθε αυτοκίνητο στο δίκτυο να είναι απαλλαγμένες από το θόρυβο. Ειδικά στα συνεργατικά συστήματα, και κυρίως για εφαρμογές ασφαλείας, είναι σημαντικό το κέρδος από την επεξεργασία των δεδομένων πριν από την εκπομπή τους στο δίκτυο. Αυτό θα γίνει καλύτερα κατανοητό στη συνέχεια σε αυτό το κεφάλαιο.

Αρχικά θα γίνει αναφορά σε κάποιες υπάρχουσες και ευρέως διαδεδομένες τεχνικές φιλτραρίσματος, ενώ στη συνέχεια θα παρουσιαστεί το προτεινόμενο φίλτρο μαζί με τα προτερήματά του. Τέλος, κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα θα παρατεθούν.

3.1 Τεχνικές φιλτραρίσματος

Σήμερα οι περισσότεροι κατασκευαστές αυτοκινήτων προσφέρουν στον στάνταρ εξοπλισμό, ή με μικρό επιπρόσθετο κόστος, δυνατότητες πλοήγησης στο αυτοκίνητο. Δηλαδή, στην ουσία το αυτοκίνητο είναι εξοπλισμένο με έναν αισθητήρα GPS και με ψηφιακούς χάρτες. Συνδυάζοντας αυτή την πληροφορία μαζί με δυναμικά δεδομένα που προέρχονται από τον δίαυλο CAN του αυτοκινήτου μπορεί να υπολογιστεί η μελλοντική κίνησή του με σχετικά καλή ακρίβεια. Το φιλτράρισμα όλων αυτών των πληροφοριών (θέσης και κινητικών δεδομένων) και η εκπομπή τους στο δίκτυο των αυτοκινήτων μπορεί έχει σημαντικά οφέλη για την οδική ασφάλεια, εφόσον δίνεται η δυνατότητα σε κάθε αυτοκίνητο-κόμβο του δικτύου να προβλέψει την πρόθεση των γειτονικών αυτοκινήτων.

Το φιλτράρισμα των δεδομένων των αισθητήρων που είναι εγκατεστημένοι στο αυτοκίνητο είναι πολύ σημαντικό ώστε οι πληροφορίες που πρόκειται να εκπνευθούν στο VANET να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβείς και να έχει αφαιρεθεί από αυτές ο θόρυβος μέτρησης. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την

εκτίμηση της πρόθεσης του κάθε οδηγού και της μελλοντικής πορείας του εκάστοτε αυτοκινήτου και απαιτούν φίλτράρισμα είναι κυρίως η θέση, η ταχύτητα, η επιτάχυνση, η γωνιακή ταχύτητα και η κατεύθυνση του αντίστοιχου αυτοκινήτου. Επιπλέον, σε περίπτωση που δεν υπάρχει ή δεν λειτουργεί κάποιος αισθητήρας, όπως για παράδειγμα το επιταχυνσιόμετρο, τότε η τιμή της επιτάχυνσης εκτιμάται από το φίλτρο με ικανοποιητική ακρίβεια με τη χρήση των μετρήσεων ταχύτητας και θέσης.

Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται ευρέως για την εκτίμηση της κατάστασης ενός αντικειμένου βασίζονται στον αλγόριθμο του Kalman [61]. Το φίλτρο Kalman αποτελεί βασικά μια προέκταση της επαναληπτικής μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων η οποία μας επιτρέπει να μοντελοποιήσουμε αποτελεσματικά την δυναμική κατάσταση τυχαίων στόχων. Παρέχει μια γενική λύση για το πρόβλημα της εκτίμησης με την επαναληπτική μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων από την κλάση των γραμμικών εκτιμητριών. Η χρήση του φίλτρου Kalman θα ελαχιστοποιήσει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα εφόσον η δυναμική κατάσταση του στόχου και ο θόρυβος μέτρησης μπορούν να μοντελοποιηθούν με ακρίβεια.

Πριν γίνει μια συνοπτική παρουσίαση των κυριότερων φίλτρων Kalman που υπάρχουν στην βιβλιογραφία και χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές, θα περιγραφεί ο τρόπος που μοντελοποιείται η κίνηση ενός αυτοκινήτου και θα αναφερθούν τα κυριότερα μοντέλα κίνησης.

3.1.1 Μοντέλα κίνησης

Η δυναμική κατάσταση ενός κινούμενου αντικειμένου μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν μια Μαρκοβιανή διαδικασία διακριτού χρόνου [62]:

$$x_{k+1} = A_k \cdot x_k + v_k \quad (3.1)$$

όπου A_k είναι ο πίνακας μετάβασης, x_k είναι το διάνυσμα κατάστασης και v_k είναι ο θόρυβος της διαδικασίας. Ο δείκτης k δείχνει τη χρονική εξέλιξη της διαδικασίας, δηλαδή x_{k+1} είναι το διάνυσμα κατάστασης τη χρονική στιγμή $k+1$ ενώ x_k είναι το διάνυσμα κατάστασης τη χρονική στιγμή k .

Η μελλοντική θέση του εξεταζόμενου αντικειμένου μπορεί να περιγραφεί με ένα διάνυσμα κατάστασης το οποίο ανάλογα με το μοντέλο που χρησιμοποιείται μπορεί να έχει μια από τις παρακάτω μορφές:

$$\underline{x} = [x \quad U_X \quad y \quad U_Y]^T \quad (3.2\alpha)$$

$$\underline{x} = [x \quad U_X \quad A_X \quad y \quad U_Y \quad A_Y]^T \quad (3.2\beta)$$

$$\underline{x} = [x \quad U_X \quad y \quad U_Y \quad \omega]^T \quad (3.2\gamma)$$

$$\underline{x} = [x \quad U_X \quad A_X \quad y \quad U_Y \quad A_Y \quad \omega]^T \quad (3.2\delta)$$

Για να καταφέρουμε μια επιτυχημένη εκτίμηση της πραγματικής κατάστασης του αυτοκινήτου το μοντέλο κίνησης που θα εφαρμοστεί πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά. Τα κυριότερα μοντέλα κίνησης που

χρησιμοποιούνται ευρέως και θα παρουσιαστούν σύντομα στη συνέχεια είναι τα ακόλουθα: σταθερής ταχύτητας (Constant Velocity – CV), σταθερής επιτάχυνσης (Constant Acceleration – CA), σταθερής γωνιακής ταχύτητας (Constant Turn Rate – CTR), σταθερής γωνιακής ταχύτητας και σταθερής εφαπτομενικής επιτάχυνσης (Constant Turn Rate and constant tangential Acceleration – CTRA). Για περισσότερες πληροφορίες ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να απευθυνθεί στα [3,63].

▪ **Μοντέλο σταθερής ταχύτητας (CV)**

Στο μοντέλο αυτό θεωρούμε ότι η ταχύτητα του αυτοκινήτου παραμένει σταθερή και στους δυο άξονες. Στην περίπτωση αυτή το διάνυσμα κατάστασης περιγράφεται από την εξίσωση (3.2α). Ο πίνακας μετάβασης του μοντέλου αυτού δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \underline{AA} & \underline{O} \\ \underline{O} & \underline{AA} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

όπου

$$\underline{AA} = \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

και \underline{O} είναι ο μηδενικός πίνακας. Επίσης dt είναι το χρονικό διάστημα που έχει οριστεί μεταξύ δυο διαδοχικών καταστάσεων και το οποίο μπορεί να είναι είτε συνεχές, είτε μεταβαλλόμενο. Στην περίπτωση του μοντέλου αυτού το αρχικό διάνυσμα κατάστασης είναι το παρακάτω:

$$\underline{x}(0) = [0 \quad U \quad 0 \quad 0]^T \quad (3.5)$$

όπου U είναι η τρέχουσα ταχύτητα του αυτοκινήτου.

▪ **Μοντέλο σταθερής επιτάχυνσης (CA)**

Στο μοντέλο αυτό θεωρούμε ότι η επιτάχυνση του αυτοκινήτου παραμένει σταθερή και στους δυο άξονες, ενώ η ταχύτητα του μεταβάλλεται. Στην περίπτωση αυτή το διάνυσμα κατάστασης περιγράφεται από την εξίσωση (3.2β). Ο πίνακας μετάβασης του μοντέλου αυτού δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \underline{AA} & \underline{O} \\ \underline{O} & \underline{AA} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

όπου:

$$\underline{AA} = \begin{bmatrix} 1 & dt & dt^2/2 \\ 0 & 1 & dt \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Στην περίπτωση του μοντέλου αυτού το αρχικό διάνυσμα κατάστασης είναι το παρακάτω:

$$\underline{x}(0) = [0 \quad U \quad A \quad 0 \quad 0 \quad \omega \cdot U]^T \quad (3.8)$$

όπου A είναι η εγκάρσια επιτάχυνση και ω η γωνιακή ταχύτητα του αυτοκινήτου.

▪ **Μοντέλο σταθερής γωνιακής ταχύτητας (CTR)**

Στο μοντέλο αυτό θεωρούμε ότι η γωνιακή ταχύτητα του αντικειμένου και η ταχύτητα του παραμένουν σταθερές. Η χαρακτηριστική εξίσωση του μοντέλου αυτού που συνδέει τον ρυθμό μεταβολής της επιτάχυνσης \dot{A} σε συνάρτηση με την ταχύτητα U και την γωνιακή ταχύτητα ω είναι η παρακάτω:

$$\dot{A} = -\omega^2 \cdot U \quad (3.9)$$

όπου η γωνιακή ταχύτητα ω ορίζεται από το παρακάτω διανυσματικό γινόμενο:

$$\omega = \frac{\bar{\omega} \times \bar{U}}{U^2} \quad (3.10)$$

Οι παραπάνω δυο εξισώσεις περιγράφουν πλήρως την δυναμική συμπεριφορά ενός αυτοκινήτου το οποίο εκτελεί μια ομαλή στροφή στην οποία θεωρούμε ότι το διάνυσμα της κεντρομόλου επιτάχυνσης είναι πάντα κάθετο στο διάνυσμα της ταχύτητας και η κίνηση γίνεται σε οριζόντιο επίπεδο. Η ταχύτητα του αντικειμένου μπορεί να αναλυθεί στους δυο άξονες με βάση τις παρακάτω εξισώσεις:

$$U_x = U \cdot \cos(\varphi) \quad (3.11\alpha)$$

$$U_y = U \cdot \sin(\varphi) \quad (3.11\beta)$$

Παίρνοντας την παράγωγο των σχέσεων (3.11) λαμβάνουμε τις παρακάτω σχέσεις που περιγράφουν την επιτάχυνση του αντικειμένου:

$$A_x = \dot{U}_x = -U \cdot \omega \cdot \sin(\varphi) = -\omega \cdot U_y \quad (3.12\alpha)$$

$$\dot{A}_x = -U \cdot \omega^2 \cdot \cos(\varphi) = -\omega^2 \cdot U_x \quad (3.12\beta)$$

$$A_y = \dot{U}_y = U \cdot \omega \cdot \cos(\varphi) = \omega \cdot U_x \quad (3.12\gamma)$$

$$\dot{A}_y = -U \cdot \omega^2 \cdot \sin(\varphi) = -\omega^2 \cdot U_y \quad (3.12\delta)$$

Οι εξισώσεις εύρεσης της θέσης λαμβάνονται θεωρώντας σταθερή γωνιακή ταχύτητα $\omega = \dot{\varphi}$:

$$x(k+1) = x(k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} U_x(\tau | t_k) d\tau = x(k) + T \cdot [SW \cdot U_x(k) - CW \cdot U_y(k)] \quad (3.13\alpha)$$

$$y(k+1) = y(k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} U_y(\tau | t_k) d\tau = y(k) + T \cdot [CW \cdot U_x(k) + SW \cdot U_y(k)] \quad (3.13\beta)$$

όπου

$$SW = \frac{\sin(\omega \cdot T)}{\omega \cdot T} \quad (3.14\alpha)$$

$$CW = \frac{1 - \cos(\omega \cdot T)}{\omega \cdot T} \quad (3.14\beta)$$

Αντιστοίχως για την ταχύτητα εξάγονται οι παρακάτω σχέσεις:

$$U_x(k+1) = U \cdot \cos(\varphi + \omega \cdot T) = U_x(k) \cdot \cos(\omega \cdot T) - U_y(k) \cdot \sin(\omega \cdot T) \quad (3.15\alpha)$$

$$U_y(k+1) = U \cdot \sin(\varphi + \omega \cdot T) = U_x(k) \cdot \sin(\omega \cdot T) + U_y(k) \cdot \cos(\omega \cdot T) \quad (3.15\beta)$$

Στην περίπτωση αυτή το διάνυσμα κατάστασης περιγράφεται από την εξίσωση (3.2γ). Έτσι, λοιπόν με βάση τις εξισώσεις (3.11), (3.12), (3.13) εξάγεται ο γραμμικοποιημένος πίνακας μετάβασης του μη-γραμμικού συστήματος που περιγράφει την ομαλή κυκλική κίνηση και ο οποίος είναι ο εξής:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\omega T)/\omega & 0 & -(1 - \cos(\omega T))/\omega & f_{15} \\ 0 & \cos(\omega T) & 0 & -\sin(\omega T) & f_{25} \\ 0 & (1 - \cos(\omega T))/\omega & 1 & \sin(\omega T)/\omega & f_{35} \\ 0 & \sin(\omega T) & 0 & \cos(\omega T) & f_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

όπου

$$dsw = \frac{\cos(\omega T)}{\omega} - \frac{\sin(\omega T)}{\omega^2 T} \quad (3.17\alpha)$$

$$dcw = \frac{\sin(\omega T)}{\omega} - \frac{1}{\omega^2 T} + \frac{\cos(\omega T)}{\omega^2 T} \quad (3.17\beta)$$

$$f_{15} = \frac{\partial x}{\partial \omega} = T \cdot (U_x \cdot dsw - U_y \cdot dcw) \quad (3.17\gamma)$$

$$f_{25} = \frac{\partial U_x}{\partial \omega} = -T \cdot (U_x \cdot \sin(\omega T) + U_y \cdot \cos(\omega T)) \quad (3.17\delta)$$

$$f_{35} = \frac{\partial y}{\partial \omega} = T \cdot (U_x \cdot dcw + U_y \cdot dsw) \quad (3.17\epsilon)$$

$$f_{45} = \frac{\partial U_y}{\partial \omega} = T \cdot (U_x \cdot \cos(\omega T) - U_y \cdot \sin(\omega T)) \quad (3.17\zeta)$$

Στην περίπτωση του μοντέλου αυτού το αρχικό διάνυσμα κατάστασης του υποκείμενου αυτοκινήτου είναι το παρακάτω:

$$\underline{x}(0) = [0 \quad U \quad 0 \quad 0 \quad \omega]^T \quad (3.18)$$

Στην περίπτωση αντικειμένου που ανιχνεύεται από τους αισθητήρες του υποκείμενου αυτοκινήτου το αρχικό διάνυσμα κατάστασης θα είναι το εξής:

$$\underline{x}(0) = \left[x_0 \quad U_x \quad y_0 \quad U_y \quad \frac{U_x \cdot A_y - U_y \cdot A_x}{U_x^2 + U_y^2} \right]^T \quad (3.19)$$

όπου

$$\underline{x} = [x_0 \quad U_x \quad A_x \quad y_0 \quad U_y \quad A_y]^T \quad (3.20)$$

είναι η δυναμική κατάσταση του συγκεκριμένου αντικειμένου όπως αυτή εξάγεται από το σύστημα σύντηξης δεδομένων των αισθητήρων του υποκείμενου αυτοκινήτου.

▪ Μοντέλο σταθερής γωνιακής ταχύτητας και σταθερής εφαπτομενικής επιτάχυνσης (CTRA)

Το μοντέλο αυτό περιγράφει με έναν πιο ρεαλιστικό τρόπο την πραγματική κίνηση του αυτοκινήτου. Θεωρούμε ότι ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας του αυτοκινήτου (εφαπτομενική επιτάχυνση) είναι σταθερός καθώς και ο ρυθμός μεταβολής της διεύθυνσής του:

$$A_T = \dot{U} = \text{const} \quad (3.21\alpha)$$

$$\omega = \dot{\varphi} = \text{const} \quad (3.21\beta)$$

Οι δυο συνιστώσες της επιτάχυνσης υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} A_x = \dot{U}_x &= \dot{U} \cdot \cos(\varphi) - U \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin(\varphi) = A_T \cdot \cos(\varphi) - \omega \cdot U \cdot \sin(\varphi) = \\ &= A_T \cdot \cos(\varphi) - \omega \cdot U_y = A_{Tx} + A_{Cx} \end{aligned} \quad (3.22\alpha)$$

$$\begin{aligned} A_y = \dot{U}_y &= \dot{U} \cdot \sin(\varphi) + U \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos(\varphi) = A_T \cdot \sin(\varphi) + \omega \cdot U \cdot \cos(\varphi) = \\ &= A_T \cdot \sin(\varphi) + \omega \cdot U_x = A_{Ty} + A_{Cy} \end{aligned} \quad (3.22\beta)$$

Οι δυο συνιστώσες της κεντρομόλου επιτάχυνσης δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$A_{Cx} = -\omega \cdot U_y \quad (3.23\alpha)$$

$$A_{Cy} = \omega \cdot U_x \quad (3.23\beta)$$

Φαίνεται εύκολα ότι:

$$A_C = \sqrt{A_{Cx}^2 + A_{Cy}^2} = \sqrt{\omega^2 \cdot U_y^2 + \omega^2 \cdot U_x^2} = \omega \cdot \sqrt{U_x^2 + U_y^2} = \omega \cdot U \quad (3.24)$$

Αντιστοίχως οι δυο συνιστώσες της εφαπτομενικής επιτάχυνσης υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$A_{Tx} = A_T \cdot \cos(\varphi) \quad (3.25\alpha)$$

$$A_{Ty} = A_T \cdot \sin(\varphi) \quad (3.25\alpha)$$

Στην περίπτωση αυτού του μοντέλου το διάνυσμα κατάστασης περιγράφεται από την εξίσωση (3.2δ). Ο πίνακας μετάβασης προκύπτει ότι είναι:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin(\omega T)}{\omega} & f(13) & 0 & \frac{\cos(\omega T)-1}{\omega} & f(16) & f(17) \\ 0 & \cos(\omega T) & T \cos(\omega T) & 0 & -\sin(\omega T) & -T \sin(\omega T) & f(27) \\ 0 & 0 & \cos(\omega T) & 0 & 0 & -\sin(\omega T) & f(37) \\ 0 & \frac{1-\cos(\omega T)}{\omega} & f(43) & 1 & \frac{\sin(\omega T)}{\omega} & f(46) & f(47) \\ 0 & \sin(\omega T) & T \sin(\omega T) & 0 & \cos(\omega T) & T \cos(\omega T) & f(57) \\ 0 & 0 & \sin(\omega T) & 0 & 0 & \cos(\omega T) & f(67) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Το αρχικό διάνυσμα κατάστασης του υποκείμενου αυτοκινήτου, στην περίπτωση του μοντέλου αυτού, είναι το παρακάτω:

$$\underline{x}(0) = [0 \quad U \quad A \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \omega]^T \quad (3.27)$$

3.1.2 Kalman φίλτρο

Το φίλτρο Kalman (Kalman Filter - KF) [3,61] αποτελεί ένα αποδοτικό αναδρομικό φίλτρο το οποίο εκτιμά την κατάσταση ενός γραμμικού δυναμικού συστήματος από μία σειρά από θορυβώδεις μετρήσεις. Είναι μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους που χρησιμοποιούνται στην ιχνηλασία και την εκτίμηση εξαιτίας της απλότητας και της σταθερότητάς της. Στην ουσία πρόκειται για επέκταση της λύσης της αναδρομικής εκτίμησης των ελαχίστων τετραγώνων η οποία επιτρέπει και την μοντελοποίηση της δυναμικής κατάστασης του στόχου. Η λύση είναι αναδρομική υπό την έννοια ότι κάθε ενημερωμένη εκτίμηση της κατάστασης του αντικειμένου υπολογίζεται με βάση την προηγούμενη κατάσταση καθώς και τα νέα δεδομένα εισόδου, επομένως μόνο η προηγούμενη εκτίμηση απαιτεί αποθήκευση. Εκτός από το γεγονός ότι δεν χρειάζεται να αποθηκευτούν όλα τα παρελθόντα παρατηρούμενα δεδομένα, το φίλτρο Kalman είναι υπολογιστικά αποδοτικότερο από τη χρησιμοποίηση για τον υπολογισμό απευθείας όλων των προηγούμενων δεδομένων σε κάθε βήμα της διαδικασίας φιλτραρίσματος.

Η χρήση του φίλτρου Kalman θα ελαχιστοποιήσει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα για το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η δυναμική κατάσταση του στόχου και ο θόρυβος μέτρησης μοντελοποιούνται με ακρίβεια. Επιπρόσθετα, εκτός από την ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, το φίλτρο αυτό έχει ένα πλήθος από πλεονεκτήματα για την εφαρμογή του σε ιχνηλασία πολλαπλών στόχων (Multiple Targets Tracking – MTT). Περισσότερες λεπτομέρειες για τα πλεονεκτήματα αυτά υπάρχουν στο [3].

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η δυναμική κατάσταση ενός αντικειμένου μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν μια Μαρκοβιανή διαδικασία διακριτού χρόνου της μορφής:

$$\underline{x}(k+1) = \underline{A} \cdot \underline{x}(k) + \underline{u}(k+1|k) + \underline{w}(k) \quad (3.28)$$

όπου \underline{x} (διάστασης $n \times 1$) είναι το διάνυσμα κατάστασης του αντικειμένου που περιέχει τις μεταβλητές εκείνες για τις οποίες θέλουμε να κάνουμε μια εκτίμηση. Επίσης, \underline{A} είναι η μήτρα μετάβασης που

υποθέτουμε ότι είναι γνωστή, $w(k)$ είναι ο μηδενικής μέσης τιμής λευκός Γκαουσιανός θόρυβος της διαδικασίας με γνωστή μήτρα συνδιακύμανσης Q και $u(k+1|k)$ είναι η ντετερμινιστική είσοδος του συστήματος, η οποία για παράδειγμα μπορεί να είναι η επιτάχυνση του στόχου όταν αυτή δεν υπάρχει μέσα στο διάλυμα κατάστασης.

Η εξίσωση (3.28) είναι μια διαφορική εξίσωση η οποία περιγράφει την δυναμική κατάσταση του στόχου σαν μια Μαρκοβιανή διαδικασία που αναπαρίσταται από το διάλυμα κατάστασης. Η διακριτού χρόνου Μαρκοβιανή διαδικασία μπορεί να οριστεί σαν μια διαδικασία στην οποία η στατιστική αναπαράστασή της στο μέλλον (σάρωση $k+1$) είναι ολοκληρωτικά καθορισμένη από την παρούσα κατάστασή της (σάρωση k). Οι δυναμικές σχέσεις συνήθως παράγονται από συνεχούς χρόνου εξισώσεις κατάστασης και έπειτα μετατρέπονται σε διακριτές της μορφής (3.28). Η εξίσωση κατάστασης οδηγείται από την ντετερμινιστική είσοδο $u(k+1|k)$, όπως επίσης και από τον τυχαίο θόρυβο $w(k)$, ο οποίος αναπαριστά την τυχαιότητα που εισάγεται στο σύστημα, όπως για παράδειγμα τον θόρυβο επιτάχυνσης του αντικειμένου.

Οι μετρήσεις μπορεί να θεωρηθεί ότι προκύπτουν από το γραμμικό συνδυασμό κάποιων από τις μεταβλητές κατάστασης του συστήματος, οι οποίες αλλοιώνονται από ασυσχέτιστο θόρυβο. Έτσι, το διάλυμα μέτρησης y (διάστασης $m \times 1$) μοντελοποιείται ως εξής:

$$y(k) = C \cdot x(k) + z(k) \quad (3.29)$$

όπου C είναι η μήτρα μέτρησης (διάστασης $m \times n$) και $z(k)$ είναι ο μηδενικής μέσης τιμής λευκός Γκαουσιανός θόρυβος μέτρησης με μήτρα συνδιακύμανσης R . Δεδομένης της δυναμικής κατάστασης του στόχου (3.28) και του μοντέλου μέτρησης (3.29) οι εξισώσεις για το φίλτρο Kalman είναι:

$$K(k) = P(k|k-1) \cdot C^T \cdot [C \cdot P(k|k-1) \cdot C^T + R]^{-1} \quad (3.30\alpha)$$

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + K(k) \cdot [y(k) - C \cdot \hat{x}(k|k-1)] \quad (3.30\beta)$$

$$P(k|k) = [I - K(k) \cdot C] \cdot P(k|k-1) \quad (3.30\gamma)$$

$$\hat{x}(k+1|k) = A \cdot \hat{x}(k|k) \quad (3.30\delta)$$

$$P(k+1|k) = A \cdot P(k|k) \cdot A^T + Q \quad (3.30\epsilon)$$

Η ενημέρωση του πίνακα συνδιακύμανσης βασίζεται στην υπόθεση ότι το κέρδος $K(k)$ του φίλτρου Kalman έχει υπολογιστεί πρώτα από τη σχέση (3.30α). Εάν εξαιτίας υπολογιστικού λάθους ο υπολογισμός του κέρδους δεν είναι ακριβής ή το κέρδος επιλέγεται με διαφορετικό τρόπο, η σταθεροποιημένη μορφή της εξίσωσης ενημέρωσης του πίνακα συνδιακύμανσης που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί είναι η εξής:

$$P(k|k) = [I - K(k) \cdot C] \cdot P(k|k-1) \cdot [I - K(k) \cdot C]^T + K(k) \cdot R \cdot K(k)^T \quad (3.31)$$

Η χρησιμοποίηση της παραπάνω σχέσης θα προσδώσει μεγαλύτερη ευστάθεια στο φίλτρο Kalman. Ο πίνακας συνδιακύμανσης ορίζεται ως εξής:

$$P(k) = E\{[x(k) - \hat{x}(k)] \cdot [x(k) - \hat{x}(k)]^T\} \quad (3.32)$$

Το διάνυσμα της διαφοράς μεταξύ των μετρούμενων και των εκτιμώμενων ποσοτήτων:

$$\tilde{y}(k) = y(k) - C \cdot \hat{x}(k | k - 1) \quad (3.33)$$

είναι το διάνυσμα υπολοίπου που έχει πίνακα συνδιακύμανσης:

$$S(k) = C \cdot P(k | k - 1) \cdot C^T + R \quad (3.34)$$

Επίσης μπορεί να οριστεί μια νέα έκδοση του φίλτρου Kalman στην οποία οι φιλτραρισμένες ποσότητες παρακάμπτονται και χρησιμοποιείται μόνο πρόβλεψη ενός βήματος. Αυτό είναι βολικό επειδή η λειτουργία πραγματικού χρόνου των συστημάτων ιχνηλασίας πολλαπλών στόχων συχνά υπαγορεύει ότι μόνο οι προβλεπόμενες ποσότητες έχουν πρακτική σημασία. Οι εξισώσεις γι' αυτό το φίλτρο Kalman είναι οι εξής:

$$K_p(k) = A \cdot P(k | k - 1) \cdot C^T \cdot [C \cdot P(k | k - 1) \cdot C^T + R]^{-1} \quad (3.35\alpha)$$

$$\hat{x}(k + 1 | k) = A \cdot \hat{x}(k | k - 1) + K_p(k) \cdot [y(k) - C \cdot \hat{x}(k | k - 1)] \quad (3.35\beta)$$

$$P(k + 1 | k) = [A - K(k) \cdot C] \cdot P(k | k - 1) \cdot A^T + Q \quad (3.35\gamma)$$

3.1.3 Εκτεταμένο Kalman φίλτρο

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται το εκτεταμένο Kalman φίλτρο (Extended Kalman Filter – EKF) ή αλλιώς μη γραμμικό φίλτρο Kalman [64,65] το οποίο βασικά αποτελεί μια επέκταση του γραμμικού φίλτρου Kalman που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Μια τέτοια επέκταση είναι δυνατή λόγω του γεγονότος ότι το φίλτρο Kalman περιγράφεται από διαφορικές εξισώσεις στη περίπτωση των συστημάτων διακριτού χρόνου. Το εκτεταμένο φίλτρο Kalman εφαρμόζεται όταν η δυναμική κατάσταση του στόχου είναι μη γραμμική ή όταν έχουμε μη γραμμική διαδικασία μέτρησης. Η εκτίμηση στα μη γραμμικά συστήματα είναι πολύ σημαντική καθώς σχεδόν όλα τα συστήματα στην πράξη – από ιχνηλασία στόχων μέχρι πλοήγηση αυτοκινήτων, από τον χημικό έλεγχο των διεργασιών εργοστασίων μέχρι μηχανές διάλυσης υλικών – εμπεριέχουν μη γραμμικά χαρακτηριστικά του ενός ή του άλλου είδους. Η ακριβής εκτίμηση της κατάστασης τέτοιων συστημάτων είναι εξαιρετικά σημαντική για ανίχνευση σφαλμάτων και εφαρμογές ελέγχου. Ωστόσο, η εκτίμηση σε μη γραμμικά συστήματα αποτελεί μια πολύ δύσκολη διαδικασία.

Η εξίσωση ενημέρωσης για το μη γραμμικό φίλτρο Kalman είναι της ίδιας μορφής με την εξίσωση του γραμμικού φίλτρου Kalman:

$$\hat{x}(k | k) = \hat{x}(k | k - 1) + K(k) \cdot \{y(k) - h[\hat{x}(k | k - 1)]\} \quad (3.36)$$

όπου $h[\hat{x}(k|k-1)]$ είναι γενικά μια μη γραμμική συνάρτηση μέτρησης, η οποία αντιστοιχεί στην ποσότητα $C \cdot \hat{x}(k|k-1)$ που έχουμε στη περίπτωση γραμμικής μέτρησης. Ο υπολογισμός του κέρδους είναι επίσης όμοιος με αυτόν του γραμμικού φίλτρου Kalman:

$$K(k) = P(k|k-1) \cdot H_x^T(k) \cdot [H_x(k) \cdot P(k|k-1) \cdot H_x^T(k) + R]^{-1} \quad (3.37)$$

όπου H_x είναι ο γραμμικός πίνακας μέτρησης που ορίζεται ως εξής:

$$H_x(k) = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}(k|k-1)} \quad (3.38)$$

Ο γραμμικός πίνακας μέτρησης έχει διαστάσεις $m \times n$ όπου n είναι η διάσταση του εκτιμώμενου διανύσματος κατάστασης και m είναι η διάσταση του διανύσματος μέτρησης.

Εναλλακτικά, ίσως θα ήταν καλύτερο να γίνεται η επεξεργασία των στοιχείων του διανύσματος παρατήρησης ακολουθιακά, με τη σειρά που καθορίζει η ακριβεία τους (η πιο ακριβής μέτρηση πρώτη). Σε κάθε περίπτωση το εκτεταμένο φίλτρο Kalman θα πρέπει να ενημερώνεται από μια βαθμωτή ποσότητα στο χρόνο έτσι ώστε ο πίνακας συνδιακύμανσης του θορύβου μέτρησης R , να είναι ακριβώς η διασπορά αυτής της βαθμωτής ποσότητας. Επιπλέον, η προσέγγιση αυτή οδηγεί σε σημαντική υπολογιστική απλοποίηση και επομένως σε αύξηση της σταθερότητας του φίλτρου.

Μια εναλλακτική προσέγγιση για την ελάττωση της επίδρασης της ανακρίβειας της εκτίμησης στον σχηματισμό του πίνακα μέτρησης H_x είναι η χρησιμοποίηση του επαναληπτικού μη γραμμικού φίλτρου Kalman. Χρησιμοποιώντας το φίλτρο αυτό οι εξισώσεις (3.36)-(3.38) επιλύονται επαναληπτικά χρησιμοποιώντας την πιο πρόσφατη εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης στο πίνακα μέτρησης H_x . Έτσι υποθέτοντας N_I επαναλήψεις και χρησιμοποιώντας δείκτη $n = 0, 1, 2, \dots, N_I - 1$ η εκτίμηση κατάστασης (3.36) για την $(n+1)$ -ιστή επανάληψη γίνεται:

$$\hat{x}(k|k)_{n+1} = \hat{x}(k|k-1) + K(k)_n \cdot RES(k)_n \quad (3.39)$$

όπου

$$RES(k)_n = y(k) - h[\hat{x}(k|k)_n] - H_x(k)_n \cdot \{\hat{x}(k|k-1) - \hat{x}(k|k)_n\} \quad (3.40\alpha)$$

$$\hat{x}(k|k)_0 = \hat{x}(k|k-1) \quad (3.40\beta)$$

Ο πίνακας μέτρησης H_x υπολογίζεται ξανά σε κάθε επανάληψη χρησιμοποιώντας τη σχέση (3.38) και την τρέχουσα εκτίμηση της κατάστασης, $\hat{x}(k|k)_n$. Το κέρδος του φίλτρου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K(k)_n = P(k|k-1) \cdot H_x^T(k)_n \cdot [H_x(k)_n \cdot P(k|k-1) \cdot H_x^T(k)_n + R]^{-1} \quad (3.41)$$

Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να σταθεροποιηθεί η εκτίμηση της κατάστασης ή μέχρι να ολοκληρωθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός επαναλήψεων. Ο υπολογισμός του πίνακα συνδιακύμανσης του σφάλματος εκτίμησης τόσο για το μη γραμμικό όσο και για το επαναληπτικό μη γραμμικό φίλτρο είναι όμοιος με αυτόν του γραμμικού φίλτρου. Για την περίπτωση του επαναληπτικού μη γραμμικού φίλτρου ο υπολογισμός του πίνακα συνδιακύμανσης δε χρειάζεται να αποτελεί μέρος της επαναληπτικής διαδικασίας [66]. Έτσι τόσο για το απλό μη γραμμικό όσο και για το επαναληπτικό μη γραμμικό φίλτρο η ενημέρωση του πίνακα συνδιακύμανσης του σφάλματος εκτίμησης θα δίνεται από τη σχέση:

$$P(k | k) = [I - K(k) \cdot H_x(k)] \cdot P(k | k - 1) \quad (3.42)$$

Στη περίπτωση του επαναληπτικού μη γραμμικού φίλτρου ο πίνακας κέρδους και ο πίνακας μέτρησης που χρησιμοποιούνται στη παραπάνω εξίσωση είναι αυτοί που υπολογίζονται στην τελευταία επανάληψη. Και στην περίπτωση αυτή, για να αντιμετωπίσουμε πιθανά αριθμητικά προβλήματα θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε την σταθεροποιημένη μορφή της παραπάνω εξίσωσης.

Στη συνέχεια ας θεωρήσουμε την πρόβλεψη κατάστασης για ένα στόχο με μη γραμμικό δυναμικό μοντέλο κίνησης. Πρώτον, η προβλεπόμενη κατάσταση μπορεί να υπολογιστεί από μια ακριβή λύση (εάν υπάρχει) ή από την αριθμητική λύση της εξίσωσης κατάστασης:

$$\hat{x}(k + 1 | k) = \hat{x}(k | k) + \int_{t_k}^{t_k + 1} \hat{x}(\tau | t_k) \partial \tau \quad (3.43)$$

Ωστόσο, μπορεί να εισαχθεί μια δεύτερης τάξης διόρθωση η οποία να αφαιρεί τις σταθερές που παράγονται από τη μη γραμμική διαδικασία πρόβλεψης.

Η πρόβλεψη του πίνακα συνδιακύμανσης μπορεί να γίνει σχεδόν όμοια με τη σχέση που χρησιμοποιήθηκε στη περίπτωση του γραμμικού φίλτρου:

$$P(k + 1 | k) = A \cdot P(k | k) \cdot A^T + Q \quad (3.44)$$

Εάν υπάρχει μια κλειστή μορφής λύση της εξίσωσης (3.43) έτσι ώστε:

$$x(k + 1) = g[x(k)] \quad (3.45)$$

τότε ο πίνακας μεταφοράς μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$A(k + 1 | k) = \left. \frac{\partial g[x(k)]}{\partial x(k)} \right|_{x=\hat{x}} \quad (3.46)$$

Εναλλακτικά, εάν η κλειστή μορφής λύση της εξίσωσης (3.43) δεν υπάρχει, τότε τα στοιχεία του πίνακα μεταφοράς μπορούν να υπολογιστούν αριθμητικά ή μπορεί να βρεθεί μια δεύτερης τάξης προσέγγιση του πίνακα μεταφοράς από την ακόλουθη σχέση:

$$A(k + 1 | k) = I + F(\hat{x}(k)) \cdot T + F^2(\hat{x}(k)) \cdot \frac{T^2}{2} + \dots \quad (3.47)$$

όπου

$$\dot{x} = f(x) \quad (3.48\alpha)$$

$$F(\hat{x}) = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} \quad (3.48\beta)$$

Τέλος ένας πιο ακριβής υπολογισμός του πίνακα συνδιακύμανσης από αυτόν της σχέσης (3.44) μπορεί να επιτευχθεί με άμεση ολοκλήρωση:

$$P(k+1 | k) = P(k | k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} \dot{P}(t | t_k) dt \quad (3.49)$$

με

$$\dot{P}(t | t_k) = F(\hat{x}(t)) \cdot P(t | t_k) + P(t | t_k) \cdot F'(\hat{x}(t)) + Q_t \quad (3.50)$$

3.1.4 Unscented Kalman φίλτρο

Το εκτεταμένο φίλτρο Kalman είναι πιθανότατα ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος εκτίμησης για μη γραμμικά συστήματα. Ωστόσο, χρόνια εμπειρίας στην επιστημονική κοινότητα έχουν δείξει ότι είναι δύσκολο να υλοποιηθεί και να ρυθμιστεί και είναι αξιόπιστο μόνο για συστήματα τα οποία είναι σχεδόν γραμμικά. Παρόλο που το εκτεταμένο φίλτρο Kalman διατηρεί την κομψή και υπολογιστικά αποδοτική αναδρομική μορφή ενημέρωσης του απλού φίλτρου Kalman, υποφέρει από μία σειρά σημαντικών περιορισμών:

- Οι γραμμικοποιημένοι μετασχηματισμοί είναι αξιόπιστοι μόνο εάν η διάδοση σφάλματος μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά από μία γραμμική συνάρτηση.
- Η γραμμικοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί μόνο εάν υπάρχει ο Ιακωβιανός πίνακας.
- Ο υπολογισμός των Ιακωβιανών πινάκων μπορεί να είναι μια πολύ δύσκολη διαδικασία η οποία είναι και επιρρεπής στα σφάλματα.

Ο μετασχηματισμός “unscented” αναπτύχθηκε για να λύσει τις αδυναμίες της διαδικασίας γραμμικοποίησης με την παροχή ενός πιο ευθύ και σαφή μηχανισμού για τον μετασχηματισμό του μέσου και του πίνακα συνδιακύμανσης. Είναι πιο ακριβής, πιο εύκολος στην υλοποίηση και χρησιμοποιεί την ίδια τάξη υπολογισμών όπως και η μέθοδος γραμμικοποίησης.

Το φίλτρο που βασίζεται στον μετασχηματισμό αυτό, δηλαδή το Unscented Kalman φίλτρο (UKF), αποτελεί μια εναλλακτική επιλογή για προβλήματα μη γραμμικής εκτίμησης με ανώτερη επίδοση σε σύγκριση με αυτή του εκτεταμένου Kalman φίλτρου. Ο αλγόριθμος αυτός για πρώτη φορά προτάθηκε από τους Julier και Uhlmann [67] και εξελίχθηκε περαιτέρω από τους Wan και van der Merwe [68].

Η κατανομή του διανύσματος κατάστασης στο UKF μπορεί να αναπαρασταθεί με μια Γκαουσιανή τυχαία μεταβλητή και ορίζεται χρησιμοποιώντας ένα ελάχιστο σύνολο από προσεκτικά επιλεγμένα σημεία

δείγματος, τα οποία ονομάζονται σημεία σίγμα (περισσότερες λεπτομέρειες μπορεί να βρει ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης στο [69]). Η αληθινή μέση τιμή και διακύμανση της Γκαουσιανής τυχαίας μεταβλητής συλλαμβάνεται ολοκληρωτικά από αυτά τα σημεία δείγματος. Η αναπαραγωγή διαμέσου του αληθινού μη γραμμικού συστήματος οδηγεί στη σύλληψη της εκ των υστέρων μέσης τιμής και συνδιακύμανσης με ακρίβεια τρίτης τάξης για οποιοδήποτε είδος μη γραμμικότητας. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τον unscented μετασχηματισμό ο οποίος σχηματικά φαίνεται στην Εικόνα 26.



Εικόνα 26: Unscented μετασχηματισμός

Ας θεωρηθεί η περίπτωση μιας τυχαίας μεταβλητής x που έχει διάσταση L , η οποία αναπαράγεται μέσω μιας μη γραμμικής συνάρτησης $y = f(x)$. Η μέση τιμή και η συνδιακύμανση αυτής της τυχαίας μεταβλητής είναι \bar{x} και P_x αντιστοίχως. Για να υπολογιστεί η στατιστική συμπεριφορά της συνάρτησης y , σχηματίζεται ο πίνακας X ο οποίος αποτελείται από $2 \cdot L + 1$ σίγμα-διανύσματα X_i . Το καθένα από αυτά τα διανύσματα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο βάρος W_i , όπως φαίνεται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$X_i = \bar{x} + \left(\sqrt{(L + \lambda) \cdot P_x} \right)_i \quad i = 1, \dots, L \quad (3.51\alpha)$$

$$X_i = \bar{x} - \left(\sqrt{(L + \lambda) \cdot P_x} \right)_i \quad i = L + 1, \dots, 2L \quad (3.51\beta)$$

$$X_0 = \bar{x} \quad (3.51\gamma)$$

Τα αντίστοιχα βάρη υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις παρακάτω σχέσεις:

$$W_0^{(m)} = \lambda / (L + \lambda) \quad (3.52\alpha)$$

$$W_0^{(c)} = \lambda / (L + \lambda) + (1 - a^2 + \beta) \quad (3.52\beta)$$

$$W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = 1 / \{2(L + \lambda)\} \quad (3.52\gamma)$$

$$\lambda = a^2 \cdot (L + \kappa) - L \quad (3.52\delta)$$

για $i = 1, \dots, 2L$. Η παράμετρος λ χρησιμοποιείται για λόγους μετατροπής της κλίμακας. Η κατανομή των σημείων σίγμα γύρω από το \bar{x} εκφράζεται χρησιμοποιώντας τον παράγοντα a , ο οποίος συνήθως παίρνει μια μικρή θετική τιμή, όπως 10^{-3} . Το κ είναι μια δευτερεύουσα παράμετρος μετατροπής κλίμακας, η οποία συνήθως ορίζεται ίση με το μηδέν και το β χρησιμοποιείται για την εισαγωγή της προϋπάρχουσας γνώσης στην κατανομή του x . Μια βέλτιστη τιμή για Γιαουσιανές κατανομές είναι $\beta = 2$. Τέλος, το $\sqrt{(L + \lambda) \cdot P_x}$ είναι η i -οστή γραμμή της τετραγωνικής ρίζας του πίνακα.

Το φίλτρο UKF ξεκινά με την αρχικοποίηση και περιλαμβάνει τις εξισώσεις υπολογισμού των σημείων σίγμα, της ανανέωσης χρόνου και της ανανέωσης μετρήσεων σε κάθε σάρωση k . Η αρχικοποίηση φαίνεται παρακάτω:

$$\hat{x}_0 = E[x_0] \quad (3.53\alpha)$$

$$P_0 = E[(x_0 - \hat{x}_0) \cdot (x_0 - \hat{x}_0)^T] \quad (3.53\beta)$$

Οι εξισώσεις ανανέωσης χρόνου είναι οι εξής:

$$X_{k-1} = [\hat{x}_{k-1} \quad \hat{x}_{k-1} + \xi \cdot \sqrt{P_{k-1}} \quad \hat{x}_{k-1} - \xi \cdot \sqrt{P_{k-1}}] \quad (3.54\alpha)$$

$$X_{k|k-1} = f(X_{k-1}), \quad \hat{x}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} \cdot X_{i,k|k-1} \quad (3.54\beta)$$

$$P_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} \cdot (X_{i,k|k-1} - \hat{x}_k^-) \cdot (X_{i,k|k-1} - \hat{x}_k^-)^T + Q \quad (3.54\gamma)$$

$$Y_{k|k-1} = g(X_{k|k-1}), \quad \hat{y}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} \cdot Y_{i,k|k-1} \quad (3.54\delta)$$

όπου $\xi = \sqrt{L + \lambda}$. Επίσης, Q και R είναι οι πίνακες συνδιακύμανσης του θορύβου διαδικασίας και μέτρησης αντιστοίχως. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εξισώσεις ανανέωσης των μετρήσεων:

$$P_{\tilde{y}_k \tilde{y}_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} \cdot (Y_{i,k|k-1} - \hat{y}_k^-) \cdot (Y_{i,k|k-1} - \hat{y}_k^-)^T + R \quad (3.55\alpha)$$

$$P_{x_k y_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} \cdot (X_{i,k|k-1} - \hat{x}_k^-) \cdot (Y_{i,k|k-1} - \hat{y}_k^-)^T \quad (3.55\beta)$$

Τέλος, ο υπολογισμός του κέρδους και η εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης μαζί με τον πίνακα συνδιακύμανσης του σφάλματος εκτίμησης γίνεται με βάση τις παρακάτω εξισώσεις:

$$K_k = P_{x_k y_k} \cdot P_{\tilde{y}_k \tilde{y}_k}^{-1} \quad (3.56\alpha)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k \cdot (y_k - \hat{y}_k^-) \quad (3.56\beta)$$

$$P_k = P_k^- + K_k \cdot P_{\tilde{y}_k \tilde{y}_k} \cdot K_k^T \quad (3.56\gamma)$$

Σε αντίθεση με τις γενικές μεθόδους δειγματοληψίας Monte-Carlo, ο Unscented μετασχηματισμός δεν απαιτεί τόσα πολλά σημεία δειγματοληψίας στην προσπάθεια για την αναπαραγωγή μιας ακριβής κατανομής που θα περιγράφει την κατάσταση ενός αντικειμένου.

3.2 Προτεινόμενο φίλτρο με χρήση ασαφούς λογικής

Σε αυτή την παράγραφο θα περιγραφεί με λεπτομέρεια το φίλτρο το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε κάθε αυτοκίνητο πριν αυτό εκπέμψει πληροφορίες στο δίκτυο των γειτονικών του αυτοκινήτων. Το φίλτρο αυτό βασίζεται στον αλγόριθμο Unscented Kalman που αναλύθηκε στην παράγραφο 3.1.4. καθώς και σε ένα σύστημα ασαφούς λογικής για την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου κίνησης στην εκάστοτε περίπτωση. Στην συνέχεια θα αναφερθούν κάποια εισαγωγικά στοιχεία για τα συστήματα ασαφούς λογικής, ενώ στο τέλος της παραγράφου θα δοθούν περισσότερες λεπτομέρειες για την υλοποίηση του φίλτρου.

3.2.1 Ασαφής λογική

Στην ενότητα αυτή γίνεται μια εισαγωγή στην θεωρία της ασαφούς λογικής (fuzzy logic). Η ασαφής λογική ξεκίνησε από τον καθηγητή επιστήμης υπολογιστών Lotfi A. Zadeh [70] του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια στο Μπέρικλεϊ. Βασικά, η ασαφής λογική επιτρέπει τον καθορισμό ενδιαμέσων τιμών μεταξύ των συμβατικών σωστό/λάθος, ναι/όχι κλπ. Έννοιες όπως “μάλλον ψηλός” ή “πολύ γρήγορος” μπορούν να διατυπωθούν μαθηματικά και να επεξεργαστούν από υπολογιστές. Σκοπός είναι η εφαρμογή ενός τρόπου σκέψης που είναι πιο κοντά στον άνθρωπο στον προγραμματισμό των υπολογιστών.

Κλασικά και ασαφή σύνολα

Ένα κλασικό σύνολο είναι ένα σύνολο το οποίο έχει ξεκάθαρα όρια. Για παράδειγμα το σύνολο A των πραγματικών αριθμών που είναι μεγαλύτεροι του 1.8 μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$A = \{x \mid x > 1.8\} \quad (3.57)$$

όπου υπάρχει ένα καθαρό και σαφές όριο, το 1.8, για το οποίο αν ένας πραγματικός x είναι μεγαλύτερος από αυτόν τον αριθμό, τότε ο x ανήκει στο σύνολο A , διαφορετικά δεν ανήκει σε αυτό. Αν και τα κλασικά σύνολα είναι κατάλληλα και επαρκή για πολλά πεδία εφαρμογών και έχουν αποδειχθεί ως ένα χρήσιμο εργαλείο για τις επιστήμες των μαθηματικών και των υπολογιστών, ωστόσο τους λείπει η ευελιξία για κάποιες εφαρμογές και δεν αντανακλούν την φύση των ανθρώπινων σκέψεων και ιδεών, οι οποίες τείνουν να είναι αφηρημένες και ανακριβείς. Σαν παράδειγμα μπορεί να θεωρηθεί η μαθηματική αναπαράσταση του συνόλου των ψηλών ανθρώπων σαν η συλλογή των ανθρώπων των οποίων το ύψος είναι μεγαλύτερο από 1.8 μέτρα. Το σύνολο αυτό μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση (3.57), εάν θεωρήσουμε ότι το A

αντιστοιχεί στους ψηλούς ανθρώπους και το x είναι το ύψος. Ωστόσο, αυτός είναι ένας αφύσικος και ανεπαρκής τρόπος για την αναπαράσταση της έννοιας των ψηλών ανθρώπων. Αυτό συμβαίνει γιατί η διχοτόμος φύση του κλασικού συνόλου θα κατηγοριοποιούσε έναν άνθρωπο με ύψος 1.81 σαν ψηλό και κάποιον με ύψος 1.79 σαν κοντό. Η διάκριση αυτή είναι διαισθητικά παράλογη.

Σε αντίθεση με το κλασικό σύνολο, ένα ασαφές σύνολο, όπως το όνομα συνεπάγεται, είναι ένα σύνολο χωρίς ξεκάθαρο όριο. Δηλαδή, η μετάβαση από το “ανήκει στο σύνολο” στο “δεν ανήκει στο σύνολο” είναι βαθμιαία και αυτή η ομαλή μετάβαση χαρακτηρίζεται από τις συναρτήσεις μέλους οι οποίες δίνουν στα ασαφή σύνολα την ευελιξία στη μοντελοποίηση κοινών γλωσσικών εκφράσεων, όπως για παράδειγμα “το νερό είναι ζεστό” ή “η θερμοκρασία είναι υψηλή”. Όπως είχε τονίσει και ο Zadeh το 1965 στη θεμελιώδη εργασία του για τα ασαφή σύνολα, τέτοια μη επαρκώς ορισμένα σύνολα ή κλάσεις παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανθρώπινη σκέψη, ειδικά στους χώρους της αναγνώρισης προτύπων, επικοινωνιών πληροφορίας, και των αφηρημένων εννοιών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ασάφεια δεν πηγάζει από την τυχαιότητα των συνιστωσών μελών των συνόλων, αλλά από την αβέβαιη και ανακριβή φύση των αφηρημένων σκέψεων και ιδεών.

Ας υποθέσουμε ότι X είναι ένας χώρος αντικειμένων και x είναι ένα γενικό στοιχείο του χώρου αυτού. Ένα κλασικό σύνολο A , όπου $A \subseteq X$, ορίζεται σαν μια συλλογή στοιχείων ή αντικειμένων $x \in X$, έτσι ώστε κάθε x να μπορεί είτε να ανήκει είτε να μην ανήκει στο σύνολο A . Ορίζοντας μια χαρακτηριστική συνάρτηση για κάθε στοιχείο x στο X , μπορούμε να αναπαραστήσουμε ένα κλασικό σύνολο A σαν ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών $(x,0)$ ή $(x,1)$, το οποίο υποδεικνύει εάν $x \notin A$ ή αν $x \in A$ αντιστοίχως.

Εάν X είναι μια συλλογή στοιχείων που δηλώνονται γενικά από το x , τότε ένα ασαφές σύνολο A στο X ορίζεται σαν ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad (3.58)$$

όπου $\mu_A(x)$ ονομάζεται η συνάρτηση μέλους για το ασαφές σύνολο A . Η συνάρτηση αυτή αντιστοιχεί κάθε στοιχείο του X σε ένα βαθμό μέλους (ή τιμή μέλους) μεταξύ του 0 και του 1.

Προφανώς, ο ορισμός του ασαφούς συνόλου είναι μια απλή επέκταση του ορισμού του κλασικού συνόλου στο οποίο η χαρακτηριστική συνάρτηση επιτρέπεται να έχει οποιοδήποτε τιμές μεταξύ 0 και 1. Εάν η τιμή της συνάρτησης μέλους $\mu_A(x)$ περιορίζεται να είναι 0 ή 1, τότε το A ανάγεται σε κλασικό σύνολο και $\mu_A(x)$ είναι η χαρακτηριστική συνάρτηση του A .

Συναρτήσεις μέλους ασαφών συνόλων και βασικοί ορισμοί

Η κατασκευή ενός ασαφούς συνόλου εξαρτάται από δυο παραμέτρους: την ταυτοποίηση ενός κατάλληλου συνόλου αναφοράς και τον καθορισμό μιας κατάλληλης συνάρτησης μέλους. Ο καθορισμός των συναρτήσεων μέλους είναι υποκειμενικός, το οποίο σημαίνει ότι οι συναρτήσεις μέλους που έχουν

οριστεί για την ίδια ιδέα (π.χ. “λογικός αριθμός παιδιών σε μια οικογένεια”) από διαφορετικά άτομα μπορεί να διαφέρει σημαντικά. Η υποκειμενικότητα αυτή πηγάζει από τις επιμέρους διαφορές που υπάρχουν στην αντίληψη ή στην έκφραση αφηρημένων ιδεών και πάρα πολύ λίγο έχει να κάνει με την τυχαιότητα. Έτσι λοιπόν η υποκειμενικότητα των ασαφών συνόλων είναι η κυριότερη διαφορά μεταξύ της μελέτης των ασαφών συνόλων και της πιθανοτικής θεωρίας, η οποία ασχολείται με την αντικειμενική αντιμετώπιση τυχαιών φαινομένων.

Ένα ασαφές σύνολο ορίζεται μοναδικά από τη συνάρτηση του μέλους. Στη συνέχεια δίνονται κάποιοι βασικοί ορισμοί οι οποίοι βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση της συνάρτησης μέλους:

- Η *υποστήριξη* (support) ενός ασαφούς συνόλου A είναι το σύνολο όλων των σημείων x του X έτσι ώστε $\mu_A(x) > 0$:

$$\text{support}(A) = \{x \mid \mu_A(x) > 0\} \quad (3.59)$$

- Ο *πυρήνας* (core) ενός ασαφούς συνόλου A είναι το σύνολο όλων των σημείων x του X έτσι ώστε $\mu_A(x) = 1$:

$$\text{core}(A) = \{x \mid \mu_A(x) = 1\} \quad (3.60)$$

- Ένα ασαφές σύνολο A είναι *κανονικό* (normal) όταν ο πυρήνας του δεν είναι κενός. Με άλλα λόγια όταν υπάρχει πάντα ένα σημείο $x \in X$ τέτοιο ώστε $\mu_A(x) = 1$.
- Το *σημείο διασταύρωσης* (crossover point) ενός ασαφούς συνόλου A είναι ένα σημείο $x \in X$ στο οποίο $\mu_A(x) = 0.5$:

$$\text{crossover}(A) = \{x \mid \mu_A(x) = 0.5\} \quad (3.61)$$

- Το ασαφές σύνολο του οποίου η υποστήριξη είναι ένα μοναδικό σημείο στο X με $\mu_A(x) = 1$ ονομάζεται *μοναδιαίο* (singleton).

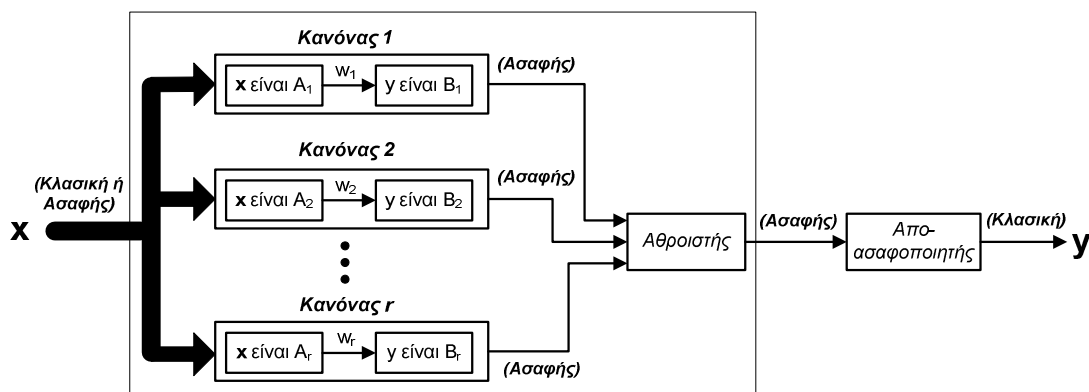
Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι συναρτήσεις μέλους ενός ασαφούς συνόλου μπορεί να έχουν τριγωνική μορφή, τραπεζοειδής, σιγμοειδής ή τη μορφή γνωστών κατανομών όπως Gauss, Bell κλπ. Για περισσότερες λεπτομέρειες ο ενδιαφερόμενος μπορεί να αναφερθεί στο [71].

Ασαφή συστήματα για εξαγωγή συμπεράσματος

Το ασαφές σύστημα για εξαγωγή συμπεράσματος είναι ένα δημοφιλές πλαίσιο υπολογισμού που βασίζεται στις έννοιες της θεωρίας ασαφών συνόλων, στους ασαφείς κανόνες εάν-τότε (if-then), και στην ασαφή συλλογιστική. Έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε ένα ευρύ φάσμα πεδίων, όπως ο αυτόματος έλεγχος, η ταξινόμηση δεδομένων, η ανάλυση αποφάσεων, τα έμπειρα συστήματα, η πρόβλεψη χρονοσειρών, η ρομποτική, καθώς και η αναγνώριση προτύπων.

Η βασική δομή ενός ασαφούς συστήματος για εξαγωγή συμπεράσματος αποτελείται από τρεις εννοιολογικές συνιστώσες: μια βάση κανόνων η οποία περιέχει μια συλλογή ασαφών κανόνων, μια βάση δεδομένων (ή λεξικό) που ορίζει τις συναρτήσεις μέλους που χρησιμοποιούνται στους ασαφείς κανόνες και έναν μηχανισμό συλλογιστικής ο οποίος επιτελεί τη διαδικασία εξαγωγής συμπεράσματος με βάση τους κανόνες και τα γεγονότα.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι το βασικό ασαφές σύστημα για εξαγωγή συμπεράσματος μπορεί να λάβει είτε ασαφής είτε κλασικές εισόδους, αλλά οι έξοδοι που παράγει είναι σχεδόν πάντα ασαφή σύνολα. Μερικές φορές όμως είναι απαραίτητο η έξοδος να μην είναι ασαφής, ιδίως σε μια κατάσταση όπου ένα ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπεράσματος χρησιμοποιείται ως ελεγκτής. Ως εκ τούτου, χρειαζόμαστε μια μέθοδο απο-ασαφοποίησης (defuzzification) για την εξαγωγή μιας συγκεκριμένης τιμής (crisp value) που αντιπροσωπεύει καλύτερα ένα ασαφές σύνολο. Το σχηματικό διάγραμμα ενός ασαφούς συστήματος εξαγωγής συμπεράσματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 27 όπου φαίνεται και το κομμάτι της απο-ασαφοποίησης το οποίο έχει ως στόχο την μετατροπή μια ασαφούς εξόδου σε μια συγκεκριμένη τιμή.



Εικόνα 27: Σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος ασαφούς εξαγωγής συμπεράσματος

Υπάρχουν διάφορα είδη συστημάτων ασαφούς λογικής για την εξαγωγή συμπεράσματος. Οι διαφορές μεταξύ τους έγκειται στην επακόλουθα (consequents) των ασαφών κανόνων τους, καθώς και στις διαφορετικές διαδικασίες άθροισης (aggregation) και απο-ασαφοποίησης. Εδώ θα ασχοληθούμε με τα ασαφή συστήματα Sugeno για εξαγωγή συμπεράσματος.

Το ασαφές μοντέλο **Sugeno** προτάθηκε από τους Takagi, Sugeno και Kang [72,73] σε μια προσπάθεια να αναπτυχθεί μια συστηματική μέθοδος για τη δημιουργία ασαφών κανόνων από ένα δοσμένο σύνολο δεδομένων εισόδου-εξόδου. Ένας τυπικός ασαφής κανόνας σε ένα ασαφές μοντέλο Sugeno έχει τη μορφή:

$$\text{αν } x \text{ είναι } A \text{ και } y \text{ είναι } B \text{ τότε } z = f(x, y), \quad (3.62)$$

όπου A και B είναι ασαφή σύνολα στην υπόθεση (antecedent), ενώ $z = f(x, y)$ είναι μια κλασική συνάρτηση (crisp function) στο συμπέρασμα (consequent). Συνήθως η $f(x, y)$ είναι πολυωνυμική συνάρτηση των μεταβλητών εισόδου x και y , αλλά μπορεί να είναι οποιαδήποτε συνάρτηση εφόσον μπορεί να περιγράψει κατάλληλα την έξοδο του μοντέλου εντός της ασαφούς περιοχής που ορίζεται από την υπόθεση του κανόνα.

Όταν η $f(x, y)$ είναι πολυωνυμική πρώτης τάξης, το παραγόμενο σύστημα εξαγωγής συμπεράσματος ονομάζεται πρώτη τάξης ασαφές μοντέλο Sugeno, το οποίο αρχικά προτάθηκε στα [72,73]. Όταν η f είναι σταθερή, τότε το αποτέλεσμα είναι ένα μηδενικής τάξης ασαφές μοντέλο Sugeno, του οποίου η έξοδος είναι μια ομαλή συνάρτηση των μεταβλητών εισόδου, εφόσον οι γειτονικές συναρτήσεις μέλους στην υπόθεση επικαλύπτονται αρκετά.

Τέλος, σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα ενός συστήματος Sugeno είναι ότι μπορεί να αποφευχθεί η διαδικασία απο-ασαφοποίησης, η οποία είναι αρκετά χρονοβόρα.

3.2.2 Προτεινόμενο φίλτρο

Η επίδοση των φίλτρων Kalman εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μοντέλο κίνησης το οποίο επιλέγεται για την ενημέρωση της κατάστασης του φίλτρου. Η κίνηση των αυτοκινήτων στους δρόμους δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί με ακρίβεια με βάση τα υπάρχοντα μοντέλα κίνησης που μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία [3,63]. Κάποια τυπικά σενάρια σε ένα οδικό περιβάλλον περιλαμβάνουν πλευρικούς ελιγμούς όπως είναι οι αλλαγές λωρίδας ή οι προσπεράσεις. Επίσης, η ταχύτητα του αυτοκινήτου μεταβάλλεται με μη σταθερό ρυθμό όταν ο οδηγός επιταχύνει πιέζοντας το πεντάλ του γκαζιού ή όταν επιβραδύνει πιέζοντας το πεντάλ του φρένου. Επιπλέον, στις περισσότερες περιπτώσεις το αυτοκίνητο ακολουθεί τη γεωμετρία του δρόμου, το οποίο σημαίνει ότι είναι πιο λογικό να επιλεγεί ένα καμπυλόγραμμο μοντέλο κίνησης στις στροφές, ενώ είναι πιο λογική η επιλογή ενός γραμμικού μοντέλου όταν το αυτοκίνητο κινείται σε ευθύγραμμα τμήματα.

Οι παραπάνω είναι οι κυριότεροι λόγοι για τους οποίους η χρήση ενός συγκεκριμένου προκαθορισμένου μοντέλου κίνησης στο φίλτρο δεν είναι αρκετή. Ένα μόνο μοντέλο δεν μπορεί να καλύψει με επαρκή τρόπο την ποικιλία της κίνησης ενός αυτοκινήτου και επομένως ένα πιο σύνθετο μοντέλο πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Το μοντέλο που προτείνεται σε αυτό το κεφάλαιο είναι στην ουσία ένας συνδυασμός απλών μοντέλων κίνησης με έναν έξυπνο τρόπο. Η καμπυλότητα του δρόμου από τους ψηφιακούς χάρτες καθώς και η γωνιακή ταχύτητα και η επιτάχυνση από το δίαυλο CAN είναι οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη για αυτό το συνδυασμό, με τελικό αποτέλεσμα την πιο ακριβή μοντελοποίηση της κίνησης του αυτοκινήτου. Τα σύστημα εναλλαγής του μοντέλου κίνησης στο φίλτρο με βάση τις παραπάνω παραμέτρους αποτελεί μία από τις καινοτομίες της παρούσας διατριβής. Στη συνέχεια θα αποδειχθεί ότι το προτεινόμενο φίλτρο, το οποίο βασίζεται στον αλγόριθμο του UKF φίλτρου και στην δυναμική επιλογή μοντέλου κίνησης, είναι ανώτερο σε επίδοση συγκριτικά με το φίλτρο EKF όπως και με το απλό UKF τα οποία βασίζονται σε ένα προκαθορισμένο μοντέλο κίνησης.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι και ο σκοπός του φιλτραρίσματος αυτού είναι διαφορετικός. Μέχρι τώρα τα φιλτραρισμένα δεδομένα χρησιμοποιούνταν για ανάπτυξη αλγορίθμων και εφαρμογών εντός του ίδιου αυτοκινήτου και δεν ήταν αντικειμενικός σκοπός η εκπομπή και χρησιμοποίηση των δεδομένων αυτών από γειτονικά αυτοκίνητα. Το γεγονός αυτό αυξάνει τις απαιτήσεις για καλύτερο φιλτράρισμα σε

πραγματικό χρόνο, δηλαδή όσο τα δυνατόν γρηγορότερη εκπομπή με όσο το δυνατόν ακριβέστερα δεδομένα.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως τα περισσότερα φίλτρα βασίζονται στην χρήση ενός μόνο μοντέλου κίνησης, αλλά αυτό δεν είναι αρκετό. Για παράδειγμα, το μοντέλο CTRA έχει καλύτερη απόδοση σε περιπτώσεις σύνθετων ελιγμών ή απότομων στροφών, ενώ σε ευθύγραμμο οδικά τμήματα το μοντέλο CA αποδεικνύεται καλύτερο [74]. Επομένως, είναι λογική η χρησιμοποίηση δυναμικά διαφορετικών μοντέλων κίνησης για την εξαγωγή της φιλτραρισμένης κατάστασης του αυτοκινήτου. Η ιδέα αυτή βασίζεται στις ακόλουθες υποθέσεις:

- Όταν ένα αυτοκίνητο κινείται σε ένα ευθύγραμμο τμήμα του δρόμου το μοντέλο που μπορεί να επιλεγεί είναι είτε το CA είτε το CV, ανάλογα με την εκάστοτε τιμή της επιτάχυνσης. Αν η τιμή της επιτάχυνσης είναι κοντά στο μηδέν τότε επιλέγεται το μοντέλο CV.
- Όταν ένα αυτοκίνητο κινείται σε μια καμπύλη τότε σύμφωνα με τις τιμές της καμπυλότητας του δρόμου και της επιτάχυνσης ένα από τα μοντέλα CTR και CTRA επιλέγεται.
- Τέλος, αν ένα αυτοκίνητο εκτελεί κάποιον ελιγμό σε ευθύγραμμο δρόμο τότε η τιμή της γωνιακής του ταχύτητας καθώς και της επιτάχυνσης υποδεικνύουν ποιο μοντέλο κίνησης θα επιλεγεί (CA σε περίπτωση που ο ελιγμός είναι ήπιος, CTR ή CTRA σε άλλες περιπτώσεις).

Η λύση που προωθείται εδώ, για το σύστημα επιλογής του κατάλληλου μοντέλου κίνησης, βασίζεται σε ένα ασφαλές σύστημα Sugeno για εξαγωγή συμπεράσματος το οποίο παίρνει σαν εισόδους την καμπυλότητα του δρόμου από τους ψηφιακούς χάρτες, καθώς και τις τιμές της επιτάχυνσης και της γωνιακής ταχύτητας από το διαύλο CAN. Οι συναρτήσεις μέλους αυτών των παραμέτρων δημιουργήθηκαν με βάση τις υποθέσεις που αναλύθηκαν προηγουμένως και παρουσιάζονται στην Εικόνα 28. Για λόγους ευκρίνειας οι συναρτήσεις μέλους είναι περιορισμένες στον άξονα x .

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος για την εκτίμηση της τρέχουσας φιλτραρισμένης κατάστασης του αυτοκινήτου φαίνεται στην Εικόνα 29. Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει υπάρχει μία τράπεζα με UKF φίλτρα τα οποία βασίζονται σε διαφορετικά μοντέλα κίνησης το καθένα και τρέχουν παράλληλα. Η έξοδος αυτής της τράπεζας φίλτρων είναι διακριτές φιλτραρισμένες καταστάσεις που βασίζονται στα ακόλουθα μοντέλα κίνησης: CV, CA, CTR και CTRA.

Τα διανύσματα κατάστασης και μέτρησης για κάθε UKF φίλτρο που τρέχει παράλληλα είναι τα εξής:

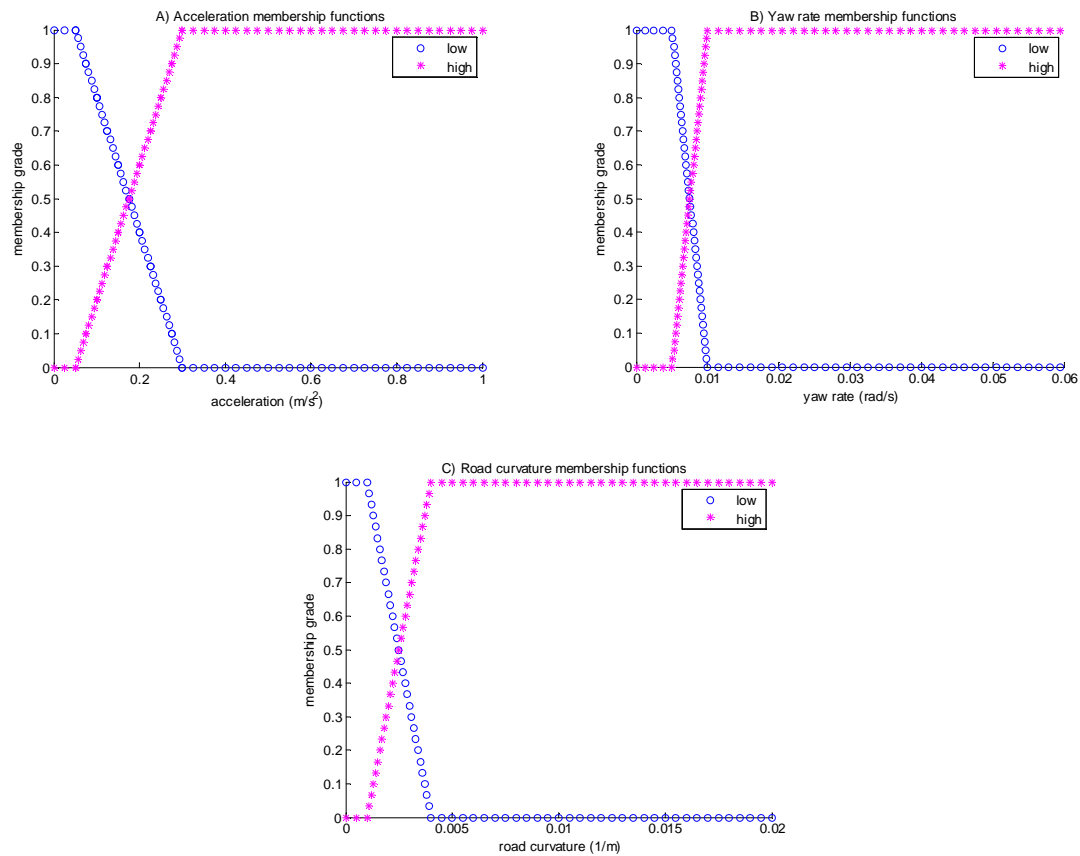
$$state_{UKF} = [x \quad y \quad v \quad a_t \quad h \quad \omega]^T \quad (3.63\alpha)$$

$$meas_{UKF} = [x \quad y \quad v \quad h \quad \omega]^T \quad (3.63\beta)$$

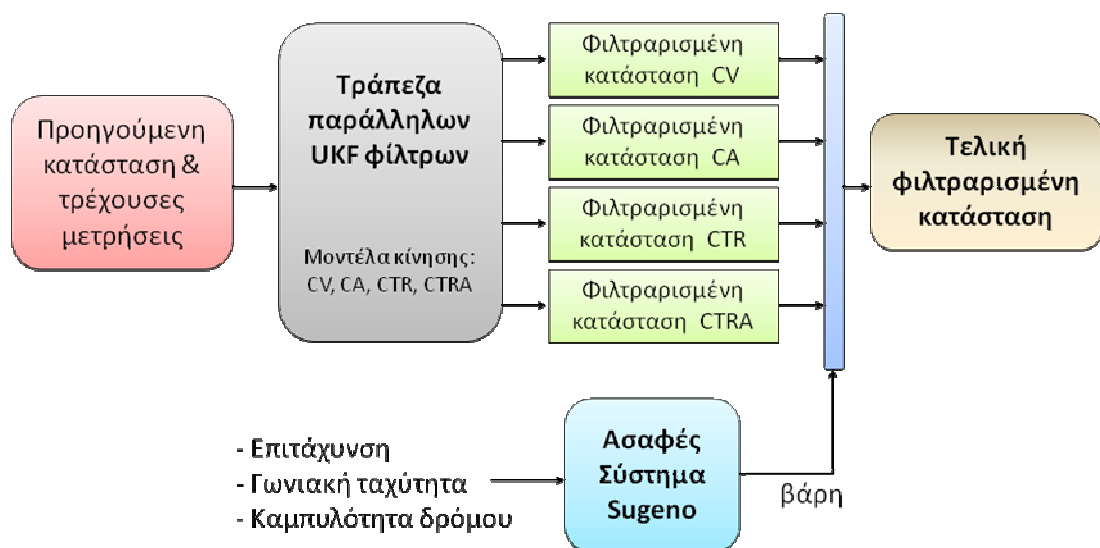
όπου x είναι η διαμήκης θέση, y η πλευρική θέση, v η ταχύτητα, a_t η εφαπτομενική επιτάχυνση, h η κατεύθυνση και ω η γωνιακή ταχύτητα.

Το τελευταίο βήμα του αλγορίθμου είναι ο τρόπος με τον οποίο θα συνδυαστούν όλα αυτά τα διανύσματα κατάστασης με σκοπό να υπολογιστεί η τρέχουσα φιλτραρισμένη κατάσταση. Αυτό το βήμα υλοποιείται με τη χρήση ενός ασφαλούς συστήματος Sugeno για εξαγωγή συμπεράσματος, το οποίο δέχεται σαν είσοδο τις τιμές της επιτάχυνσης, της γωνιακής ταχύτητας και της καμπυλότητας του δρόμου. Η έξοδος

αυτού του ασαφούς συστήματος είναι ένα διάνυσμα με τα βάρη των τεσσάρων μοντέλων κίνησης που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Αυτά τα βάρη μαζί με τα φιλτραρισμένα διανύσματα κατάστασης από τα διαφορετικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της τελικής φιλτραρισμένης κατάστασης.



Εικόνα 28: Συναρτήσεις μέλους για α) επιτάχυνση, β) γωνιακή ταχύτητα και γ) καμπυλότητα του δρόμου



Εικόνα 29: Φίλτρο του αυτοκινήτου για την τελική εκτίμηση της τρέχουσας κατάστασης

Οι κανόνες που χρησιμοποιούνται από το ασαφές σύστημα Sugeno για την εξαγωγή των απαραίτητων βαρών και τον υπολογισμό της τελικά φιλτραρισμένης τρέχουσας κατάστασης τονίζονται παρακάτω. Οι κανόνες αυτοί είναι σε πλήρη συμφωνία με τις υποθέσεις που παρουσιάστηκαν νωρίτερα σε αυτή την παράγραφο και είναι οι ακόλουθοι:

- AN επιτάχυνση είναι χαμηλή ΚΑΙ (γωνιακή ταχύτητα είναι χαμηλή Ή καμπυλότητα δρόμου είναι χαμηλή) ΤΟΤΕ επέλεξε το *CV* μοντέλο.
- AN επιτάχυνση είναι υψηλή ΚΑΙ (γωνιακή ταχύτητα είναι χαμηλή Ή καμπυλότητα δρόμου είναι χαμηλή) ΤΟΤΕ επέλεξε το *CA* μοντέλο.
- AN επιτάχυνση είναι χαμηλή ΚΑΙ (γωνιακή ταχύτητα είναι υψηλή Ή καμπυλότητα δρόμου είναι υψηλή) ΤΟΤΕ επέλεξε το *CTR* μοντέλο.
- AN επιτάχυνση είναι υψηλή ΚΑΙ (γωνιακή ταχύτητα είναι υψηλή Ή καμπυλότητα δρόμου είναι υψηλή) ΤΟΤΕ επέλεξε το *CTRA* μοντέλο.

3.3 Μετρήσεις και αποτελέσματα

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα που αφορούν το φιλτράρισμα των δεδομένων του αυτοκινήτου, τα οποία βασίστηκαν σε προσομοιώσεις. Το γεγονός ότι έγιναν προσομοιώσεις οφείλεται στο ότι δεν ήταν διαθέσιμος ο απαραίτητος εξοπλισμός στο ερευνητικό αυτοκίνητο (βλέπε Παράρτημα Α), κατά τη διάρκεια μελέτης του συγκεκριμένου προβλήματος.

Αρχικά, περιγράφεται σύντομα η διαδικασία προσομοίωσης και αναλύονται τα σενάρια που χρησιμοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα οργανώνονται σε τρεις διαφορετικές ομάδες. Στην αρχή γίνεται σύγκριση του UKF φίλτρου με το αντίστοιχο EKF χρησιμοποιώντας ως μοντέλα κίνησης τα CA και CTRA. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση του απλού UKF φίλτρου, χρησιμοποιώντας διάφορα μοντέλα κίνησης, με το προτεινόμενο φίλτρο. Τέλος, εξάγονται κάποια χρήσιμα συμπεράσματα για την χρήση του προτεινόμενου φίλτρου σε συνεργατικές εφαρμογές.

3.3.1 Διαδικασία προσομοιώσεων

Στην ενότητα που ακολουθεί γίνεται η αξιολόγηση του προτεινόμενου φίλτρου με χρήση δεδομένων προσομοίωσης. Συχνά αντί της φράσης «προτεινόμενο φίλτρο» χρησιμοποιείται η φράση «προσαρμοστικό φίλτρο» στη συνέχεια του εγγράφου. Οι όροι αυτοί αναφέρονται στο ίδιο ακριβώς πράγμα και χρησιμοποιούνται εναλλακτικά. Πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές σειρές δοκιμών, όπου κάθε μία έχει ένα συγκεκριμένο στόχο. Η πρώτη σειρά έχει ως στόχο τη σύγκριση της απόδοσης μεταξύ EKF και UKF. Η δεύτερη σειρά δείχνει την ανωτερότητα του προτεινόμενου φίλτρου σε σχέση με το απλό UKF,

ενώ η τελευταία τονίζει το όφελος από τη χρήση αυτού του φίλτρου σε συνεργατικές εφαρμογές⁷.

Για το σκοπό των προσομοιώσεων δύο βασικά σενάρια αναπτύχθηκαν. Το πρώτο αφορά την κίνηση ενός αυτοκινήτου τόσο σε καμπύλα όσο και σε ευθύγραμμο οδικά τμήματα, καθώς και την εκτέλεση ελιγμών κατά τη διάρκεια του σεναρίου, δηλαδή επιταχύνσεις, επιβραδύνσεις, αλλαγές λωρίδας κ.λπ. Το αυτοκίνητο περιλαμβάνει αισθητήρες για τη μέτρηση των δυναμικών χαρακτηριστικών της κίνησής του (γωνιακή ταχύτητα, ταχύτητα και επιτάχυνση), ένα GPS αισθητήρα και ψηφιακούς χάρτες. Το σενάριο αυτό, αν και περίπλοκο, επιλέχθηκε διότι καλύπτει όλες τις δυνατές κινήσεις του αυτοκινήτου στο οδικό περιβάλλον. Το σενάριο αυτό χρησιμοποιείται για τις δύο πρώτες σειρές δοκιμών.

Για την τρίτη σειρά δοκιμών χρησιμοποιήθηκε το δεύτερο σενάριο. Σε αυτό το σενάριο συμμετέχουν δύο αυτοκίνητα. Στην αρχή του σεναρίου τα αυτοκίνητα αυτά κινούνται σε ένα ευθύγραμμο τμήμα της οδού και στη συνέχεια εισέρχονται σε ένα κυρτό τμήμα όπου συνεχίζουν να κινούνται μέχρι το τέλος του σεναρίου. Το πρώτο αυτοκίνητο (υποκείμενο αυτοκίνητο) είναι εξοπλισμένο με έναν ενεργό μικροκυματικό αισθητήρα ραντάρ για την ανίχνευση αντικειμένων στην πρόσθια περιοχή (εμβέλεια = 150m, γωνία αντίληψης = 12°, ρυθμός ανίχνευσης = 100ms) ενώ περιλαμβάνει και αισθητήρες για τη μέτρηση των παραμέτρων της κίνησής του (ταχύτητα, επιτάχυνση και γωνιακή ταχύτητα). Επίσης, είναι εξοπλισμένο με μια μονάδα εύρεσης θέσης που περιλαμβάνει έναν GPS δέκτη και ψηφιακούς χάρτες. Αυτή η μονάδα είναι υπεύθυνη για τον υπολογισμό των συντεταγμένων θέσης του αυτοκινήτου καθώς και της καμπυλότητας του δρόμου στο σημείο αυτό κάθε δευτερόλεπτο. Τέλος, έχει μια μονάδα ασύρματης επικοινωνίας για την ανταλλαγή μηνυμάτων κάθε 100ms με άλλα αυτοκίνητα στο οδικό περιβάλλον. Το δεύτερο αυτοκίνητο διαθέτει παρόμοιο εξοπλισμό με το πρώτο, με τη μόνη διαφορά ότι δεν είναι εξοπλισμένο με αισθητήρα ραντάρ.

Η απόδοση του κάθε φίλτρου αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας το μέσο τετραγωνικό σφάλμα εκτίμησης (RMS error). Τα σφάλματα αυτά αφορούν τη θέση, την ταχύτητα, την επιτάχυνση και τη γωνιακή ταχύτητα, ανάλογα και με την εκάστοτε σειρά δοκιμών. Διαφορετικές σειρές δοκιμών χρησιμοποιούν διαφορετικές παραμέτρους για σύγκριση. Ενδεικτικά το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της θέσης δίνεται παρακάτω:

$$Rms_k^D = \sqrt{(\hat{x}_k - x_k)^2 + (\hat{y}_k - y_k)^2} \quad (3.64)$$

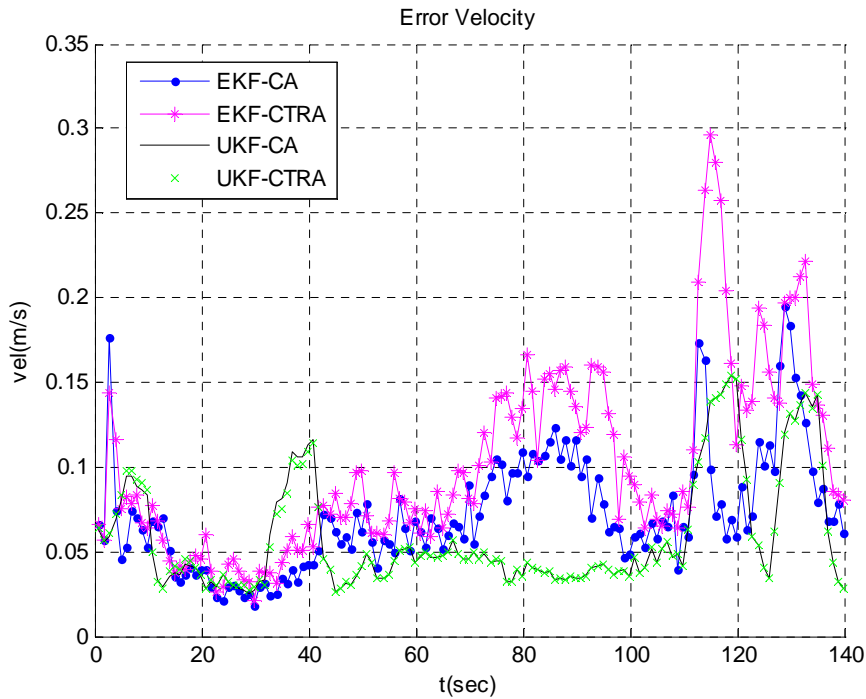
όπου (\hat{x}_k, \hat{y}_k) , (x_k, y_k) είναι η εκτιμώμενη και η πραγματική θέση του στόχου, αντίστοιχα, στη σάρωση k . Προκειμένου να εξαχθούν πιο ομαλές τιμές (χαμηλότερη μεταβλητότητα) για αυτά τα σφάλματα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των Monte Carlo προσομοιώσεων. Ο συνολικός αριθμός των διαδοχικών επαναλήψεων επιλέχθηκε να είναι $N_{MC} = 50$. Στην περίπτωση αυτή, τα αντίστοιχα μέσα τετραγωνικά σφάλματα δίνονται από την σχέση:

$$\overline{Rms_k^D} = (1/N_{MC}) \cdot \sum_{i=1}^{N_{MC}} Rms_{k,i}^D \quad (3.65)$$

⁷ Συνεργατικές είναι οι εφαρμογές που αναπτύσσονται μεταξύ αυτοκινήτων σε ένα VANET.

3.3.2 Σύγκριση EKF και UKF

Ο αντικειμενικός σκοπός της πρώτης σειράς δοκιμών είναι να καταδείξουν την ανωτερότητα του UKF φίλτρου σε σύγκριση με το EKF. Για τις δοκιμές αυτές επιλέχθηκαν δύο μοντέλα κίνησης: το CA και το CTRA. Ενδεικτικά στην Εικόνα 30 δίνεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της ταχύτητας, ενώ στον Πίνακα 6 φαίνονται τα σφάλματα για τη θέση, την ταχύτητα, την επιτάχυνση και τη γωνιακή ταχύτητα.



Εικόνα 30: Σφάλμα ταχύτητας EKF και UKF με χρήση CA και CTRA μοντέλων κίνησης

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά το UKF υπερτερεί του EKF σε όλες τις ελεγχόμενες κατηγορίες. Το εκτιμώμενο σφάλμα στη θέση χρησιμοποιώντας το UKF φίλτρο είναι περίπου τρεις φορές μικρότερο από ότι με τη χρήση του EKF, ανεξάρτητα από το επιλεγόμενο μοντέλο κίνησης. Επίσης, ο θόρυβος που προέρχεται από τις μετρήσεις της ταχύτητας, της γωνιακής ταχύτητας και της επιτάχυνσης φιλτράρεται πολύ καλύτερα με τη χρήση του UKF φίλτρου.

RMS σφάλματα	EKF		UKF	
	CA	CTRA	CA	CTRA
Θέση (m)	0.3824	0.3991	0.1273	0.1278
Ταχύτητα (m/s)	0.0717	0.1008	0.0592	0.0593
Επιτάχυνση (m/s ²)	0.0494	0.0645	0.0076	0.0076
Γωνιακή ταχύτητα (x10 ⁻⁴ rad/s)	N/A	7.3440	N/A	3.3529

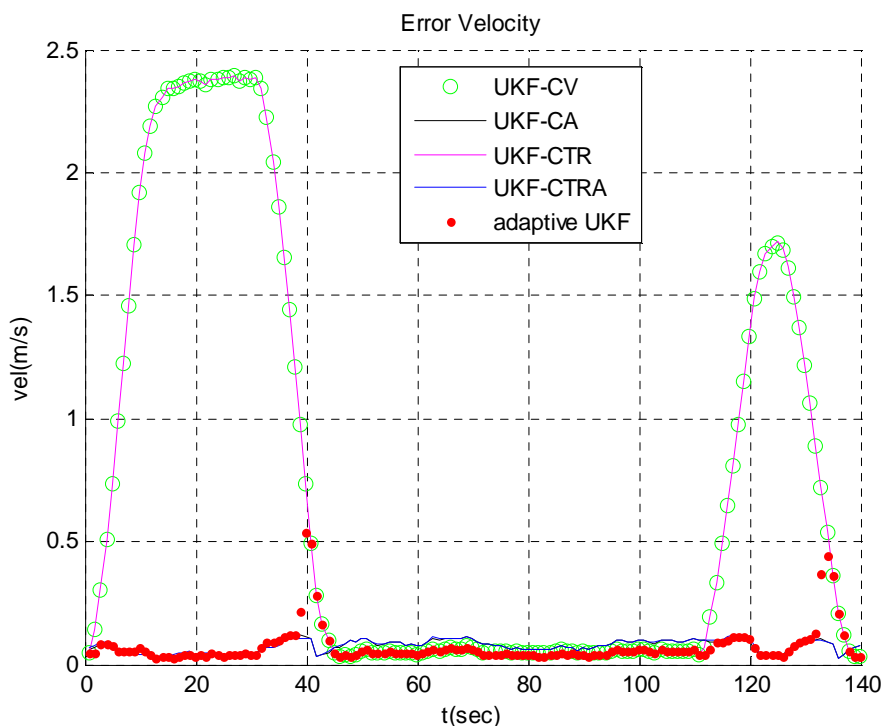
N/A: Μη εφαρμόσιμο

Πίνακας 6: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα για UKF και EKF φίλτρα με χρήση των μοντέλων CA και CTRA

Παρότι δεν είναι στο πλαίσιο του συγκεκριμένου κεφαλαίου να συγκρίνει τα μοντέλα κίνησης, δηλαδή το CA και το CTRA, μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι το CA δίνει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό, είναι ότι σε αυτό το συγκεκριμένο σενάριο, η πλειονότητα των χρησιμοποιούμενων οδικών τμημάτων είναι ευθύγραμμο πάνω στα οποία το αυτοκίνητο κινείται με σταθερή επιτάχυνση.

3.3.3 Σύγκριση απλού UKF με το προτεινόμενο UKF

Στόχος της δεύτερης σειράς δοκιμών είναι να αναδείξει τα οφέλη που απορρέουν από το συνδυασμό διαφορετικών μοντέλων κίνησης, που επιλέγονται με βάση την πραγματική κίνηση του αυτοκινήτου, σε αντίθεση με τη χρησιμοποίηση ενός μόνο προκαθορισμένου μοντέλου. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της θέσης και της ταχύτητας δίνονται στον Πίνακα 7, ενώ το σφάλμα της ταχύτητας απεικονίζεται και στην Εικόνα 31.



Εικόνα 31: Σφάλμα ταχύτητας για απλό και προτεινόμενο UKF

Μπορεί να παρατηρήσει κανείς από τα αποτελέσματα του Πίνακα 7 ότι το σφάλμα θέσης είναι πολύ μικρό, ανεξάρτητα από το μοντέλο που χρησιμοποιείται, επομένως το πλεονέκτημα χρησιμοποιώντας το προσαρμοστικό UKF φίλτρο δεν είναι και τόσο προφανές. Ακόμη και σε αυτή την περίπτωση, η εκτίμηση της θέσης χρησιμοποιώντας το προσαρμοστικό UKF είναι βελτιωμένη. Όσον αφορά το σφάλμα της ταχύτητας, τα μοντέλα κίνησης που αποδείχθηκε ότι έχουν καλές επιδόσεις είναι το CA, το CTRA και το

προσαρμοστικό. Αυτό είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι η κίνηση του αυτοκινήτου περιλαμβάνει συχνά επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του σεναρίου.

RMS σφάλματα	UKF				
	CV	CA	CTR	CTRA	ADAP
Θέση ($m \times 10^{-2}$)	13.168	13.392	13.793	13.503	12.359
Ταχύτητα (m/s)	0.7342	0.0754	0.7328	0.0760	0.0545

ADAP: Το προτεινόμενο UKF φίλτρο

Πίνακας 7: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα για απλό και προτεινόμενο UKF φίλτρο

3.3.4 Εφαρμογή του προτεινόμενου φίλτρου σε συνεργατικές εφαρμογές

Τέλος, η τρίτη σειρά δοκιμών διεξάγεται με σκοπό να τονίσει τη συμβολή της προτεινόμενης προσέγγισης (προσαρμοστικό φίλτρο) στην εκτίμηση της κατάστασης ενός στόχου που εντοπίστηκε από το ραντάρ του υποκείμενου αυτοκινήτου με την ταυτόχρονη αξιοποίηση των ασύρματων μηνυμάτων που προέρχονται από το VANET. Το μικροκυματικό ραντάρ μεγάλης εμβέλειας που χρησιμοποιείται παρέχει ακριβείς μετρήσεις μόνο για τη θέση του αντικειμένου που ανιχνεύεται. Η εκτίμηση των δυναμικών χαρακτηριστικών αυτού, ειδικά των πλευρικών, χρησιμοποιώντας μόνο τις μετρήσεις από το ραντάρ είναι αρκετά κακή. Η εκμετάλλευση των VANET μηνυμάτων, συμπεριλαμβανομένων των δυναμικών μετρήσεων (γωνιακή ταχύτητα, ταχύτητα και επιτάχυνση) που προέρχονται απευθείας από τους αισθητήρες του άλλου αυτοκινήτου, απέδειξε ένα συνολικό πρόσθετο όφελος για την εκτίμηση της κατάστασης αυτού. Η εκτίμηση αυτή υπολογίζεται τόσο με τη χρήση ασύρματων μηνυμάτων όσο και χωρίς αυτά.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 8 και είναι ενδεικτικά του οφέλους που έχει η χρήση ασύρματης επικοινωνίας στην εκτίμηση της κατάστασης των άλλων αυτοκινήτων στο οδικό περιβάλλον.

RMS σφάλματα	ΜΕ ΔΙΚΤΥΟ	ΧΩΡΙΣ ΔΙΚΤΥΟ
Θέση (m)	0.4513	0.4992
Ταχύτητα (m/s)	0.1215	3.9982

Πίνακας 8: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα με και χωρίς τη χρήση ασύρματης επικοινωνίας

Τέλος, μπορεί κανείς να παρατηρήσει από τον Πίνακα 8 ότι η βελτίωση στην εκτίμηση της ταχύτητας είναι σημαντική σε σύγκριση με τη βελτίωση στην εκτίμηση της θέσης. Αυτό συμβαίνει επειδή το ραντάρ δίνει κακές μετρήσεις της ταχύτητας, οι οποίες βελτιώνονται σε μεγάλο βαθμό με την αξιοποίηση πληροφοριών από το ασύρματο μέσο.

Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά έγινε μια συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων κίνησης που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και των τεχνικών φιλτραρίσματος που στηρίζονται στον αλγόριθμο του Kalman. Στη συνέχεια έγινε μια μικρή εισαγωγή στα ασαφή συστήματα και ειδικά στο Sugeno σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή του μοντέλου κίνησης στο τροποποιημένο φίλτρο που προτάθηκε σε αυτό το κεφάλαιο.

Το προτεινόμενο φίλτρο που παρουσιάστηκε λαμβάνει υπόψη την καμπυλότητα του δρόμου, τη γωνιακή ταχύτητα και την επιτάχυνση του αυτοκινήτου για να μοντελοποιήσει την κίνησή του με πιο ρεαλιστικό τρόπο. Το φίλτρο αυτό αποδείχθηκε ανώτερο σε επίδοση τόσο από το εκτεταμένο Kalman όσο και από το απλό Unscented Kalman το οποίο χρησιμοποιεί ένα μόνο προκαθορισμένο μοντέλο κίνησης. Το πλεονέκτημα του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι ότι εμμεταλλεύεται τα δεδομένα από τους ψηφιακούς χάρτες και τις πληροφορίες που αφορούν τη δυναμική κατάσταση του αυτοκινήτου ώστε να επιλέξει τα καταλληλότερα μοντέλα κίνησης και να τα συνδυάσει με τελικό στόχο τη μείωση των σφαλμάτων του φιλτραρίσματος.

ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκε ο αλγόριθμος φιλτραρίσματος εντός του αυτοκινήτου, ενώ ταυτόχρονα επισημάνθηκε η σημασία του φιλτραρίσματος στα ασύρματα δίκτυα των αυτοκινήτων. Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί ένα βήμα παραπάνω κατά το οποίο γίνεται χρήση των φιλτραρισμένων αυτών πληροφοριών ώστε να υπολογιστεί η μελλοντική τροχιά τόσο του υποκείμενου αυτοκινήτου όσο και των υπόλοιπων αυτοκινήτων στο οδικό περιβάλλον.

Το κεφάλαιο αρχίζει με κάποια εισαγωγικά στοιχεία και συνεχίζει με επισκόπηση της αρχιτεκτονικής του συστήματος, η οποία αναλύθηκε εκτενώς στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας διατριβής. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη αναφορά στις τεχνικές ιχνηλάσιας και συσχέτισης δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων, οι οποίες όμως δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας διατριβής. Ακολούθως, παρουσιάζεται ο αλγόριθμος για τον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς και περιγράφεται συνοπτικά η θεωρία Dempster-Shafer πάνω στην οποία βασίζεται.

Τέλος, παρουσιάζονται οι μετρήσεις που έγιναν για την αξιολόγηση του αλγορίθμου και παρατίθενται τα αποτελέσματα τα οποία είναι άκρως ενθαρρυντικά και δείχνουν σημαντικά κέρδη στον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς από τη χρήση των ασύρματων πληροφοριών. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι οι μετρήσεις έγιναν με τη χρήση δύο διαφορετικών συστημάτων:

- Με τη χρήση του ερευνητικού αυτοκινήτου της ομάδας I-SENSE (βλέπε Παράρτημα Α) και ενός I.X. αυτοκινήτου (βλέπε Παράρτημα Β) και
- Με τη χρήση δύο αυτοκινήτων επίδειξης του Ερευνητικού Κέντρου της FIAT (CRF) [75] στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος SAFESPOT [37].

4.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, στο Κεφάλαιο 1, οι υπάρχουσες εφαρμογές ασφαλείας των αυτοκινήτων στηρίζονται κυρίως στους αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι πάνω στο αυτοκίνητο, όπως είναι τα ραντάρ και οι σαρωτές λέιζερ. Το πρόβλημα με τη χρήση μόνο αυτών των αισθητήρων είναι ότι το πεδίο αντίληψης του οδηγού παραμένει περιορισμένο λόγω της περιορισμένης εμβέλειάς τους. Συνεπώς με τη προσθήκη εξοπλισμού για τη λήψη (και αποστολή) δεδομένων από το ασύρματο δίκτυο διευρύνεται το

πεδίο του οδηγού σε αρκετές εκατοντάδες μέτρα (σε μερικές περιπτώσεις και μερικά χιλιόμετρα), ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται και η αξιοπιστία ολόκληρου του συστήματος αντίληψης σε περίπτωση που χαλάσει κάποιος αισθητήρας.

Η σύντηξη πληροφοριών από αυτοκίνητα που κινούνται με μεγάλη ταχύτητα και σχηματίζουν ασύρματο δίκτυο είναι μία πρόκληση [76,77]. Μια σύντομη αναφορά για την ιχνηλασία και τη συσχέτιση δεδομένων από τους αισθητήρες και τα ασύρματα μηνύματα γίνεται στην παράγραφο 4.3 στη συνέχεια. Ωστόσο, στην παρούσα διατριβή το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε υψηλού επιπέδου αλγορίθμους σύντηξης όπως είναι ο αλγόριθμος υπολογισμού της μελλοντικής τροχιάς.

Οι υπάρχοντες αλγόριθμοι για τον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς βασίζονται κυρίως στην εκτίμηση της δυναμικής κατάστασης του αυτοκινήτου, σε δεδομένα από τους χάρτες, σε δεδομένα από την επεξεργασία κάμερας καθώς και στην ιχνηλασία από ραντάρ [78-81]. Παρόλο που αυτοί οι αλγόριθμοι είναι επαρκείς στην περίπτωση υπολογισμού της μελλοντικής τροχιάς του υποκείμενου αυτοκινήτου, δεν αρκούν για τον σωστό υπολογισμό της στην περίπτωση των υπόλοιπων αυτοκινήτων στο οδικό περιβάλλον. Η δυναμική κατάσταση των υπόλοιπων αυτοκινήτων εκτιμάται με βάση τα ίχνη από τα ραντάρ και γενικά χρησιμοποιώντας απομακρυσμένη ανίχνευση, γεγονός που σημαίνει ότι η εκτίμηση αυτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την απόδοση και τους περιορισμούς του εκάστοτε αισθητήρα. Στην εργασία η οποία παρουσιάζεται στα [80,81] γίνεται μια προσπάθεια υπολογισμού της μελλοντικής τροχιάς των υπόλοιπων αυτοκινήτων χωρίς τη χρήση ασύρματης επικοινωνίας. Η εκτίμηση της δυναμικής κατάστασης των υπόλοιπων αυτοκινήτων βασίζεται σε προ-επεξεργασμένα δεδομένα από τους αισθητήρες ραντάρ καθώς και σε τεχνικές ιχνηλασίας και σύντηξης. Το ραντάρ παρέχει ακριβείς μετρήσεις θέσης, αλλά δεν ισχύει το ίδιο και με τις μετρήσεις της ταχύτητας. Στην ουσία το ραντάρ μετράει την ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας του αυτοκινήτου στόχου, η οποία εξαρτάται από τη σχετική θέση και κίνηση τόσο του υποκείμενου όσο και του αυτοκινήτου στόχου. Επιπλέον, το ραντάρ δεν παρέχει μετρήσεις σχετικές με την επιτάχυνση, την κατεύθυνση και την γωνιακή ταχύτητα του στόχου με αποτέλεσμα η εκτίμησή τους να λαμβάνει χώρα στο υποκείμενο αυτοκίνητο με χρήση ενός φίλτρου Kalman, το οποίο δεν δίνει καλά αποτελέσματα από τη στιγμή που η μετρούμενη ταχύτητα που χρησιμοποιείται στην εκτίμηση είναι η ακτινική. Σαν συνέπεια η χρήση αυτών των τιμών για τον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς των υπόλοιπων αυτοκινήτων είναι ριψοκίνδυνη και μη κατάλληλη για κρίσιμες, σχετικές με την ασφάλεια, καταστάσεις.

Στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής χρησιμοποιείται η ασύρματη επικοινωνία μεταξύ του υποκείμενου αυτοκινήτου και των υπόλοιπων αυτοκινήτων για τον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς τους. Παρουσιάζεται ένας καινοτόμος αλγόριθμος ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις τιμές της καμπυλότητας του δρόμου, της επιτάχυνσης και της γωνιακής ταχύτητας για να δώσει μια πιο αξιόπιστη εκτίμηση της μελλοντικής τροχιάς. Η κυριότερη διαφορά από προηγούμενες προσεγγίσεις είναι ότι η δυναμική κατάσταση του κάθε αυτοκινήτου εξάγεται από μετρήσεις που προέρχονται κατευθείαν από το ίδιο το αυτοκίνητο και όχι από επεξεργασία απομακρυσμένων μετρήσεων των αισθητήρων οι οποίες περιέχουν και θόρυβο. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι κατάλληλος για αυτοκινητόδρομους και επαρχιακούς δρόμους και όχι για αστικά περιβάλλοντα που είναι πολύ δυναμικά.

Γενικά, η εκτίμηση της μελλοντικής τροχιάς του εκάστοτε χρήστη του δρόμου είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ασφάλεια και επομένως ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται εδώ μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την ικανοποίηση των περισσότερων εφαρμογών ασφαλείας, όπως είναι για παράδειγμα η προειδοποίηση σύγκρουσης, η αποφυγή σύγκρουσης, το φρενάρισμα έκτακτης ανάγκης (Emergency Electronic Brake Lights - EEBL) κλπ. Η εφαρμογή φρεναρίσματος έκτακτης ανάγκης χρησιμοποιείται στη συνέχεια σαν παράδειγμα όπου ο προτεινόμενος αλγόριθμος υλοποιείται και δοκιμάζεται σε συγκεκριμένα σενάρια. Περισσότερες πληροφορίες για την εφαρμογή αυτή, το λόγο που επιλέχθηκε, τις δοκιμές και τα τελικά αποτελέσματα θα παρατεθούν στις παραγράφους που ακολουθούν σε αυτό το κεφάλαιο.

4.2 Επισκόπηση του συστήματος

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια γενική επισκόπηση του συστήματος και του αλγορίθμου για τον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς του αυτοκινήτου. Η επισκόπηση αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 32 και αναλύεται στη συνέχεια σε αυτή την παράγραφο. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί ότι το σύστημα που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο ακολουθεί τη γενική αρχιτεκτονική αναφοράς που παρουσιάστηκε προηγουμένως στο Κεφάλαιο 2 της διατριβής.

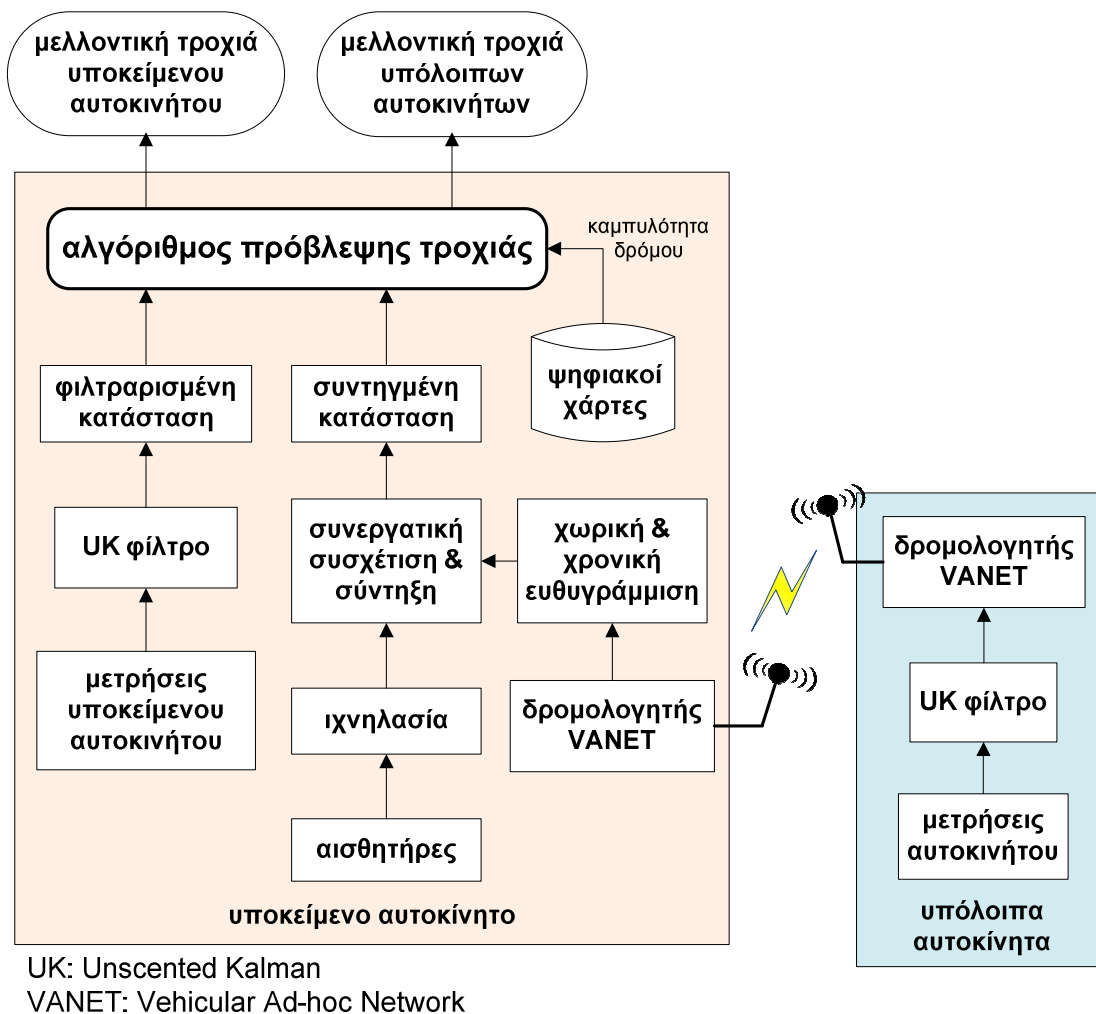
Κάθε αυτοκίνητο του δικτύου πρέπει να είναι εξοπλισμένο τουλάχιστον με ένα VANET δρομολογητή, ένα δέκτη GPS και αδρανειακούς αισθητήρες για μέτρηση της ταχύτητας, της επιτάχυνσης και της γωνιακής ταχύτητας. Επίσης, πρέπει να περιέχει ένα Unscented Kalman φίλτρο [67,68,74] για φιλτράρισμα των παραπάνω πληροφοριών πριν από την εικοπή τους στο δίκτυο, όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά και στο προηγούμενο κεφάλαιο της διατριβής (Κεφάλαιο 3). Επομένως, μόνο φιλτραρισμένες τιμές ανταλλάσσονται μεταξύ των αυτοκινήτων στο VANET. Το υποκείμενο αυτοκίνητο μπορεί να είναι εξοπλισμένο με έναν ή περισσότερους αισθητήρες αντίληψης του οδικού περιβάλλοντος, όπως ραντάρ και σαρωτές λέιζερ. Στο παρόν κεφάλαιο λαμβάνεται υπόψη μόνο το ραντάρ μεγάλης εμβέλειας το οποίο είναι εγκατεστημένο στο κέντρο του μπροστινού προφυλακτήρα του υποκείμενου αυτοκινήτου⁸.

Κάθε αυτοκίνητο που ανήκει στο δίκτυο εκπέμπει περιοδικά μηνύματα (beacons or beaconing messages) κάθε 250 ms. Τα μηνύματα αυτά είναι μικρού μεγέθους και περιέχουν πληροφορίες για τη δυναμική κατάσταση του αυτοκινήτου που τα εκπέμπει, όπως είναι η ταχύτητα, η επιτάχυνση και η γωνιακή ταχύτητα. Επιπλέον, περιλαμβάνουν τη θέση του αυτοκινήτου σε τιμές γεωγραφικού πλάτους (latitude) και γεωγραφικού μήκους (longitude) καθώς και την κατεύθυνσή του (heading). Με τον τρόπο αυτό ο οδηγός του υποκείμενου αυτοκινήτου ενημερώνεται συνεχώς για την κατάσταση των γειτόνων του.

Εκτός από τα περιοδικά εκπεμπόμενα μηνύματα υπάρχει και μία άλλη κλάση VANET μηνυμάτων, τα μηνύματα γεγονότος (event messages), τα οποία εκπέμπονται σε περίπτωση που ανιχνευτεί κάποιο συγκεκριμένο γεγονός. Για παράδειγμα, ένα μήνυμα το οποίο πληροφορεί ότι κάποιο αυτοκίνητο φρενάρει απότομα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από την EEBL εφαρμογή και δεν υπάρχει λόγος να εκπέμπεται

⁸ Περισσότερες λεπτομέρειες για τον ερευνητικό αυτοκίνητο της ομάδας I-SENSE το οποίο είναι το υποκείμενο αυτοκίνητο υπάρχουν στο Παράρτημα Α.

περιοδικά, είναι ένα μήνυμα γεγονότος. Στη συνέχεια με βάση τις πληροφορίες από τα μηνύματα, είτε περιοδικά είτε γεγονότος, που εκπέμπονται στο δίκτυο και με την επεξεργασία των δεδομένων των αισθητήρων που είναι εγκατεστημένοι στο αυτοκίνητο γίνεται ο υπολογισμός της μελλοντικής τροχιάς όλων των αυτοκινήτων που έχουν ανιχνευτεί.



Εικόνα 32: Επισκόπηση του συστήματος για υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς

Στην ουσία ο αλγόριθμος για τον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς είναι ίδιος για όλα τα αυτοκίνητα, συμπεριλαμβανομένου και του υποκείμενου αυτοκινήτου. Ο αλγόριθμος αυτός παίρνει σαν είσοδο το διάνυσμα κατάστασης, το οποίο περιλαμβάνει τις φιλτραρισμένες τιμές της θέσης, της ταχύτητας, της επιτάχυνσης, της κατεύθυνσης και της γωνιακής ταχύτητας, καθώς και πληροφορίες που αφορούν την καμπυλότητα του δρόμου από τη βάση δεδομένων των ψηφιακών χαρτών. Για το υποκείμενο αυτοκίνητο οι τιμές αυτές λαμβάνονται κατευθείαν από το φίλτρο του. Για τα υπόλοιπα αυτοκίνητα οι τιμές αυτές προκύπτουν από τα μηνύματα του σύρματος δικτύου ύστερα από χωρική και χρονική ευθυγράμμιση, από τα ίχνη των αισθητήρων του υποκείμενου αυτοκινήτου ή από συνδυασμό των ίχνων των αισθητήρων με τα μηνύματα του VANET σε περίπτωση που αφορούν το ίδιο αυτοκίνητο. Περισσότερες πληροφορίες για την ιχνηλασία και τις τεχνικές συσχέτισης δεδομένων καθώς και περισσότερες λεπτομέρειες για τον αλγόριθμο

υπολογισμού της μελλοντικής τροχιάς θα παρατεθούν στις παραγράφους που ακολουθούν.

Η τελική έξοδος αυτού του συστήματος είναι οι εκτιμώμενες μελλοντικές τροχιές τόσο του υποκείμενου αυτοκινήτου όσο και των υπόλοιπων αυτοκινήτων που είναι παρόντα στην οδική περιοχή και είτε ανιχνεύονται από κάποιον αισθητήρα είτε από τα μηνύματα του VANET είτε και από τα δύο. Ύστερα από την εξαγωγή των μελλοντικών τροχιών, χρειάζεται μια μικρή επιπρόσθετη επεξεργασία και προσαρμογή των δεδομένων σύμφωνα και με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής και στη συνέχεια ο οδηγός μπορεί να πληροφορηθεί άμεσα για επικείμενες επικίνδυνες καταστάσεις.

4.3 Ιχνηλασία και συσχέτιση δεδομένων

Σκοπός της παρούσας παραγράφου είναι να παρουσιαστούν συνοπτικά μερικά στοιχεία που αφορούν την ιχνηλασία αυτοκινήτων και τη συσχέτιση δεδομένων που προέρχονται τόσο από αισθητήρες του υποκείμενου αυτοκινήτου όσο και από τα περιοδικά μηνύματα που λαμβάνονται από το ασύρματο δίκτυο. Δεν αποτελεί στόχο της παραγράφου αυτής η σε βάθος ανάλυση αυτών των θεμάτων, καθώς δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας διατριβής, αλλά κρίνονται σημαντικά για την κατανόηση του υπόλοιπου κεφαλαίου.

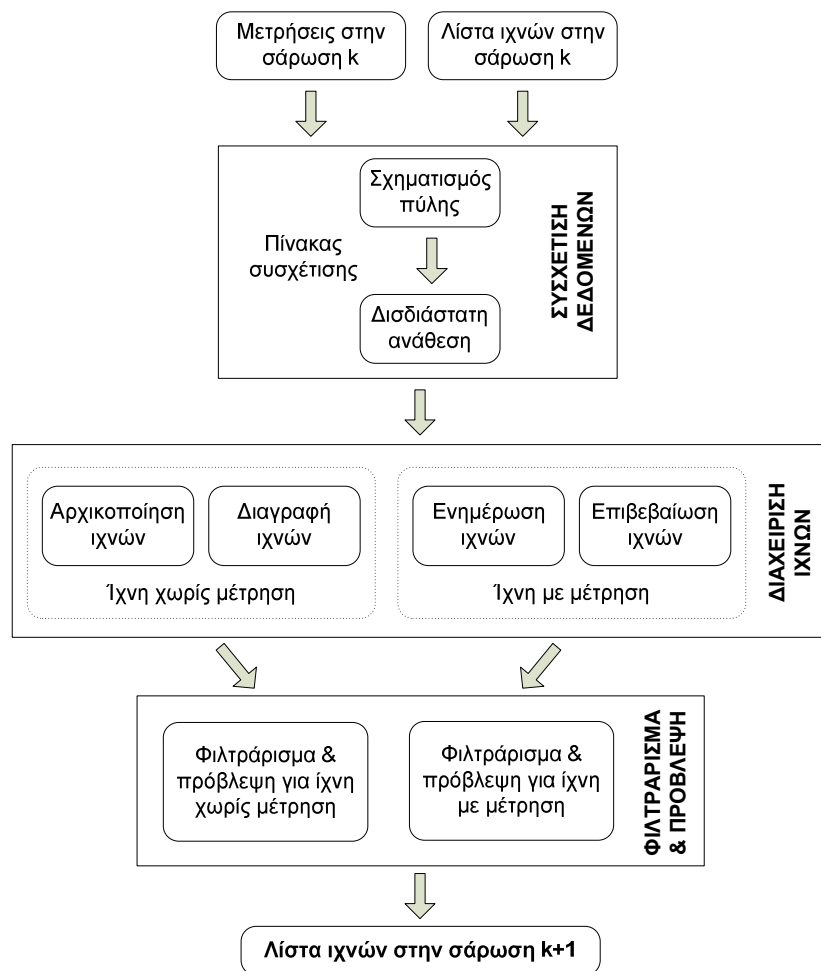
Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι το φιλτράρισμα των δυναμικών δεδομένων του υποκείμενου αυτοκινήτου καθώς και των υπόλοιπων αυτοκινήτων, πριν εκπέμψουν τις σχετικές πληροφορίες, γίνεται μέσω ενός Unscented Kalman φίλτρου, το οποίο αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

4.3.1 Ιχνηλασία

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή αυτού του κεφαλαίου, το υποκείμενο αυτοκίνητο είναι εξοπλισμένο με ένα ραντάρ μεγάλης εμβέλειας το οποίο είναι τοποθετημένο στο μέσο περίπου του εμπρός προφυλακτήρα. Το ραντάρ αυτό παρέχει μετρήσεις θέσης και ταχύτητας για τα αντικείμενα που ανιχνεύει. Για το φιλτράρισμα του ανεπιθύμητου θορύβου καθώς και για την εκτίμηση παραμέτρων τις οποίες δεν παρέχει το ραντάρ, όπως η επιτάχυνση των στόχων, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος ιχνηλασίας. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας δίνει δεδομένα υψηλής ποιότητας με πολύ μικρό ποσοστό ψευδών συναγερμών (false alarm ratio), επομένως χρησιμοποιείται ένας σχετικά απλός αλγόριθμος ιχνηλασίας.

Οι πληροφορίες που αποστέλλονται από τη μονάδα ιχνηλασίας του ραντάρ στη μονάδα σύντηξης είναι μια λίστα από ιχνηλατημένα αντικείμενα που περιλαμβάνει τις ακόλουθες πληροφορίες: αριθμό αντικειμένων, θέση X σε m , θέση Y σε m , σχετική ταχύτητα X σε m/s , σχετική ταχύτητα Y σε m/s , σχετική επιτάχυνση X σε m/s^2 , σχετική επιτάχυνση Y σε m/s^2 , ID του αντικειμένου, πίνακας συνδιακύμανσης του σφάλματος εκτίμησης.

Ο αλγόριθμος ιχνηλασίας του ραντάρ παρουσιάζεται στην Εικόνα 33. Στην ουσία πρόκειται για ένα συμβατικό σύστημα ιχνηλασίας το οποίο χωρίζεται σε τρεις κυρίως μονάδες: συσχέτιση δεδομένων, διαχείριση ίχνους, φιλτράρισμα και πρόβλεψη [82].

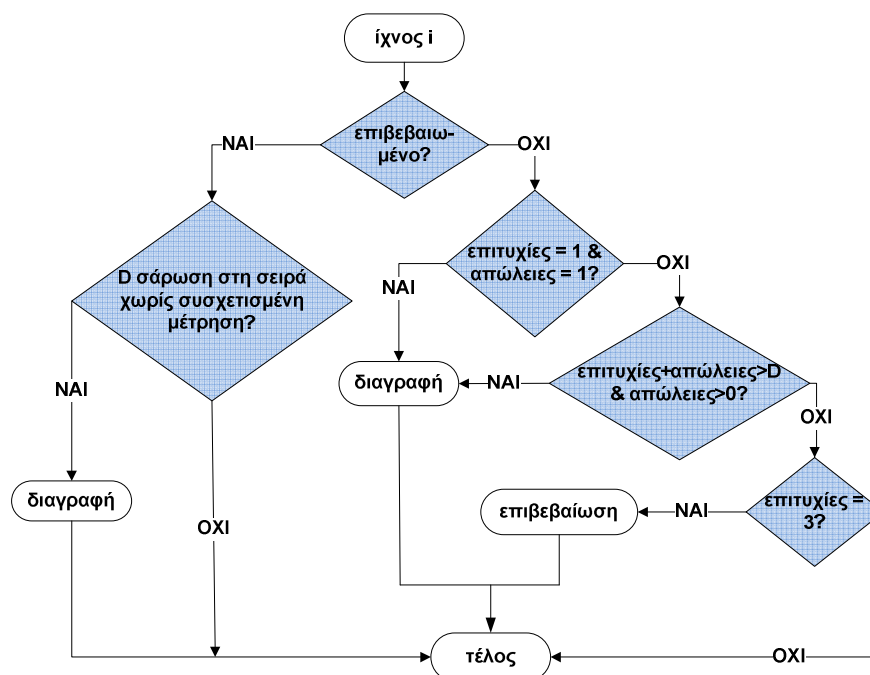


Εικόνα 33: Αλγόριθμος ιχνηλασίας του ραντάρ μακρινής εμβέλειας

Η εκτίμηση της κατάστασης των ιχνηλατημένων αντικειμένων γίνεται με τη χρήση ενός CTRA μοντέλου κίνησης και μέσω ενός εκτεταμένου φίλτρου Kalman. Περισσότερες πληροφορίες για το CTRA και το Kalman φίλτρο δόθηκαν στο Κεφάλαιο 3 προηγούμενως. Το πρόβλημα της ανάθεσης, το οποίο είναι η εύρεση της καλύτερης συσχέτισης μεταξύ ίχνων και μετρήσεων ελαχιστοποιώντας μια συνάρτηση κόστους, λύνεται με τον αλγόριθμο του καθολικού κοντινότερου γείτονα (Global Nearest Neighbor - GNN) [83]. Το τυπικό πρόβλημα της δισδιάστατης (2D) ανάθεσης λύνεται με τον αλγόριθμο της δημοπρασίας (auction algorithm) [84].

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάθεσης, αν ένα ίχνος έχει συσχετιστεί με κάποια μέτρηση τότε έχει “επιτυχία” (hit) στην τρέχουσα σάρωση, αλλιώς έχει μια “απώλεια” (miss). Οι τιμές των “επιτυχιών” και των “απωλειών” αποθηκεύονται για κάθε ίχνος και επισυνάπτονται σε αυτό. Η διαχείριση των ίχνων πραγματοποιείται μέσω κανόνων που σχετίζονται με τον αριθμό των “επιτυχιών” και των “απωλειών” για την αρχικοποίηση και την διατήρηση ίχνων. Για την επιβεβαίωση και την διαγραφή ίχνων χρησιμοποιείται

ο αλγόριθμος που φαίνεται στην Εικόνα 34. Σε κάθε σάρωση το κάθε ίχνος εξετάζεται ξεχωριστά. Σε περίπτωση που πρόκειται για επιβεβαιωμένο ίχνος από την προηγούμενη σάρωση τότε εξετάζεται αν κάποια μέτρηση ανατίθεται στο συγκεκριμένο ίχνος ή όχι. Σε περίπτωση που έχουν περάσει D (εδώ το D επιλέγεται ίσο με 5) συνεχόμενες σαρώσεις χωρίς να υπάρχει συσχέτιση με κάποια μέτρηση τότε το ίχνος διαγράφεται. Αν το ίχνος δεν είναι επιβεβαιωμένο από προηγούμενη σάρωση αλλά πιθανό (tentative track) τότε λαμβάνονται υπόψη οι “επιτυχίες” και οι “αποτυχίες” και η επιβεβαίωση του ίχνους γίνεται σε περίπτωση που παρατηρηθούν τρεις συνεχόμενες “επιτυχίες”. Σε κάθε άλλη περίπτωση το ίχνος διαγράφεται ή χρειάζονται περισσότερες σαρώσεις για να παρθεί μια απόφαση. Όταν ένα νέο ίχνος επιβεβαιώνεται ή κάποιο υπάρχον ίχνος διαγράφεται, η λίστα των ιχνηλατημένων αντικειμένων ενημερώνεται ανάλογα.



Εικόνα 34: Αλγόριθμος διαχείρισης ιχνών

Ο αλγόριθμος ιχνηλασίας δίνει σαν έξοδο σε κάθε εκτέλεσή του μία λίστα η οποία περιέχει το εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης και τον αντίστοιχο πίνακα συνδιακύμανσης για το κάθε επιβεβαιωμένο ίχνος. Περισσότερες λεπτομέρειες για τους αλγορίθμους ιχνηλασίας του ραντάρ μεγάλης εμβέλειας μπορούν να βρεθούν στη σχετική βιβλιογραφία, η οποία είναι αρκετά μεγάλη. Ενδεικτικά ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να απευθυνθεί στα [85,86].

Τέλος, στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι ένας πανομοιότυπος αλγόριθμος ιχνηλασίας εφαρμόζεται και στις μετρήσεις που προέρχονται από τη μεριά του VANET, το οποίο στην ουσία αποτελεί έναν εικονικό αισθητήρα (virtual sensor). Η φιλοσοφία ιχνηλασίας είναι ακριβώς η ίδια και το μόνο που διαφοροποιείται είναι το διάνυσμα μέτρησης και τα επίπεδα θορύβου στο φίλτρο.

4.3.2 Συσχέτιση δεδομένων και σύντηξη

Η πλατφόρμα πολλαπλών αισθητήρων που χρησιμοποιείται στο υποκείμενο αυτοκίνητο παρέχει δεδομένα ιχνών τα οποία προέρχονται από δύο πολύ διαφορετικούς αισθητήρες, το ραντάρ μακρινής εμβέλειας (LRR) και το δίκτυο των αυτοκινήτων. Οι δύο αυτές πηγές παρέχουν πληροφορίες που αφορούν τα αυτοκίνητα στο γειτονικό περιβάλλον του υποκείμενου αυτοκινήτου οι οποίες πρέπει να συσχετιστούν. Από τη μία, το ραντάρ έχει υψηλό ρυθμό ανανέωσης μετρήσεων και μικρό χρόνο απόκρισης. Από την άλλη, τα μηνύματα του VANET περιέχουν κινηματικές πληροφορίες όπως είναι η ταχύτητα και η γωνία στροφής που προέρχονται κατευθείαν από τα παρατηρούμενα ίχνη. Ωστόσο, ο ρυθμός ανανέωσης των μηνυμάτων από το VANET είναι αρκετά χαμηλότερος από τον αντίστοιχο του ραντάρ. Επίσης, σημαντικό πρόβλημα μπορεί να αποτελέσει η καθυστέρηση που υπεισέρχεται στη λήψη των δεδομένων από το VANET, πρόβλημα που υπάρχει σε όλα τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας.

Επομένως, υπάρχει ανάγκη να συσχετιστούν τα ίχνη από το ραντάρ με τα μηνύματα που προέρχονται από το VANET. Επιπλέον, οι δύο αυτές πηγές πληροφορίας πρέπει να συνδυαστούν ώστε να δώσουν μία κοινή έξοδο.

Πρώτα απ' όλα, οι μετρήσεις του ραντάρ ιχνηλατούνται και ο ιχνηλάτης παρέχει σε κάθε κύκλο επεξεργασίας μια λίστα από διανύσματα εκτίμησης που περιγράφουν την κατάσταση των ιχνηλατημένων αντικειμένων. Ο ιχνηλάτης του ραντάρ εκτελείται όταν ένα νέο σύνολο μετρήσεων ληφθεί ή όταν έχει παρέλθει ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα από την τελευταία εκτέλεση του αλγορίθμου. Η λίστα με τα διανύσματα κατάστασης στην έξοδο είναι η $S_{t_k} = \{x_{1_{t_k}}^r, x_{2_{t_k}}^r, \dots, x_{N_{t_k}}^r\}$ όπου $x_{i_{t_k}}^r$ είναι το διάνυσμα κατάστασης του i -οστού ίχνους τη χρονική στιγμή t_k .

Τα μηνύματα που λαμβάνονται από το VANET αποθηκεύονται σε έναν καταχωρητή (buffer) για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα και μόλις αυτό παρέλθει τότε διαγράφονται. Μια λογική επιλογή για ένα τέτοιο χρονικό παράθυρο θα μπορούσε να ήταν τα δύο δευτερόλεπτα, μιας και μόλις περάσει αυτό το χρονικό διάστημα τα μηνύματα είναι ουσιαστικά άχρηστα. Το ID από το VANET για το κάθε αυτοκίνητο χρησιμοποιείται ώστε ο καταχωρητής να περιέχει μόνο ένα μήνυμα για το κάθε αυτοκίνητο, το πιο πρόσφατο. Η λίστα με τα διανύσματα κατάστασης που προέρχονται από το VANET και αποθηκεύεται στον καταχωρητή συσχετίζεται με την αντίστοιχη λίστα ιχνών του ραντάρ. Η λίστα από το VANET τη χρονική στιγμή t_l είναι $V_{t_l} = \{x_{1_{t_l}}^v, x_{2_{t_l}}^v, \dots, x_{M_{t_l}}^v\}$ όπου $x_{j_{t_l}}^v$ είναι το j -οστό διάνυσμα κατάστασης που λήφθηκε τη χρονική στιγμή t_l . Οι τιμές που περιέχονται σε αυτά τα μηνύματα δεν φιλτράρονται ξανά, διότι είναι ήδη φιλτραρισμένες από τη μονάδα φιλτραρίσματος του αυτοκινήτου που εκπέμπει το μήνυμα. Ο τρόπος και ο λόγος για τον οποίο γίνεται το συγκεκριμένο φιλτράρισμα αναλύθηκαν διεξοδικά στο προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής.

Το πρώτο βήμα για την συσχέτιση των λιστών που προέκυψαν παραπάνω είναι η χρονική και η χωρική ευθυγράμμισή τους. Η χωρική ευθυγράμμιση είναι μια σχετικά απλή διαδικασία που

πραγματοποιείται με τον μετασχηματισμό των ιχνών στο σύστημα συντεταγμένων του υποκείμενου αυτοκινήτου και περιλαμβάνει απλές μαθηματικές διαδικασίες [87]. Η χρονική ευθυγράμμιση είναι πιο πολύπλοκη διαδικασία και προϋποθέτει ότι τα ρολόγια όλων των αυτοκινήτων στο δίκτυο είναι απόλυτα συγχρονισμένα. Η χρονική ευθυγράμμιση επιτυγχάνεται με τη μοντελοποίηση της εξέλιξης της κατάστασης των αυτοκινήτων με τη βοήθεια του μοντέλου κίνησης CTRA [3,63] και την πρόβλεψη με τη χρήση ενός φίλτρου Kalman. Η εκτίμηση της κατάστασης του m -οστού ίχνους και ο αντίστοιχος πίνακας συνδιακύμανσης, ευθυγραμμισμένα τη χρονική στιγμή $t_{aligned}$, δίνονται από τις εξισώσεις:

$$x_{m_{aligned}}^q = A \cdot x_{m_t}^q, \quad q = VANET, LRR \quad (4.1)$$

$$P_{m_{aligned}}^q = A \cdot P_{m_t}^q \cdot A^T + Q_{m_t}^q, \quad q = VANET, LRR \quad (4.2)$$

όπου A είναι ο πίνακας μετάβασης του μοντέλου κίνησης, ενώ Q είναι ο πίνακας συνδιακύμανσης του θορύβου διαδικασίας.

Στην συνέχεια, οι ευθυγραμμισμένες λίστες υφίστανται τη διαδικασία σχηματισμού πύλης (gating procedure). Η διαδικασία αυτή είναι μια τεχνική για την εξάλειψη των μη πιθανών ζευγών ίχνους με ίχνος ή μέτρησης με ίχνος. Μια πύλη σχηματίζεται γύρω από κάθε ίχνος του ραντάρ και τα ίχνη του VANET που “πέφτουν” μέσα σε αυτή την πύλη, δηλαδή ικανοποιούν την σχέση της πύλης, λαμβάνονται υπόψη για την ενημέρωση του ίχνους. Η σχέση που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι η ακόλουθη:

$$a_{ij} = G_{ij} - d_{ij}^2 \quad (4.3)$$

όπου G_{ij} είναι το μέγεθος της πύλης και d_{ij} είναι η στατιστική απόσταση μεταξύ των μετρήσεων του ραντάρ και του VANET. Η συσχέτιση πραγματοποιείται με την εφαρμογή του GNN αλγορίθμου [83]. Το διάνυσμα συσχέτισης είναι $Assoc = [s_1, s_2, \dots, s_N]$, $s_k \in \{\emptyset, \{1, \dots, M\}\}$, όπου το $\{1, \dots, i, \dots, M\}$ δηλώνει ότι το s_k ίχνος του VANET ανατίθεται στο i -οστό ίχνος του ραντάρ και το \emptyset δηλώνει ένα ίχνος το οποίο δεν έχει ανατεθεί.

Έπειτα τα ίχνη συνδυάζονται χρησιμοποιώντας την μέθοδο που περιγράφεται στο [88] όπου η κατάσταση των δύο ιχνών έπειτα από τη σύντηξη δίνεται από τη σχέση:

$$x = x_i + (P_i - P_{ij})(P_i + P_j - P_{ij} - P_{ij})^{-1}(x_i - x_j) \quad (4.4)$$

όπου P_i είναι ο πίνακας συνδιακύμανσης για την εκτίμηση x_i και P_{ij} είναι ο πίνακας ετερο-συνδιακύμανσης (cross-covariance) μεταξύ των x_i και x_j [9].

Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται για τη ρύθμιση (tuning) των πινάκων συνδιακύμανσης. Το ραντάρ εκτιμάει τη θέση των στόχων με σχετικά μικρό σφάλμα. Η ακρίβεια όμως της εκτίμησης που αφορά την επιτάχυνση και τη γωνιακή ταχύτητα εξαρτάται από την ένταση του ελιγμού που εκτελείται από τα ίχνη. Από τη άλλη, τα ίχνη από το VANET περιέχουν τις τιμές για την επιτάχυνση και τη γωνιακή ταχύτητα

απευθείας από τους αισθητήρες των αυτοκινήτων του δικτύου, επομένως οι τιμές αυτές είναι υψηλής ακρίβειας. Λαμβάνοντας υπόψη τα γεγονότα αυτά οι πίνακες συνδιακύμανσης προσαρμόζονται ανάλογα για να συνδυάσουν αποδοτικά τις εκτιμήσεις από τα δύο ίχνη (του ραντάρ και του VANET) χωρίς να αυξήσουν τη συνολική συνδιακύμανση της εκτίμησης.

4.4 Πρόβλεψη μελλοντικής τροχιάς αυτοκινήτων

Η παράγραφος αυτή χωρίζεται σε δύο τμήματα: εισαγωγή στη θεωρία Dempster-Shafer και αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου πρόβλεψης της μελλοντικής τροχιάς του υποκείμενου αυτοκινήτου καθώς και των άλλων αυτοκινήτων του οδικού περιβάλλοντος.

4.4.1 Θεωρία Dempster-Shafer

Στην πραγματικότητα η θεωρία των Dempster-Shafer [89,90] προσφέρει μια εναλλακτική μαθηματική αναπαράσταση της αβεβαιότητας σε σχέση με τη παραδοσιακή θεωρία πιθανοτήτων. Η σημαντική καινοτομία αυτού του θεωρητικού πλαισίου είναι ότι επιτρέπει την κατανομή μάζας πιθανότητας ακόμα και σε σύνολα ή διαστήματα. Μάλιστα δεν χρειάζεται να γίνει κάποια υπόθεση σχετικά με την πιθανότητα των μεμονωμένων στοιχείων του συνόλου ή του διαστήματος αυτού. Επιπλέον, σε αντίθεση με τη κλασική θεωρία πιθανοτήτων η οποία θεωρεί ως δεδομένο ότι κάτι είναι ή δεν είναι αληθές, η θεωρία των Dempster-Shafer επιτρέπει την ύπαρξη πιο ασαφών καταστάσεων όπως είναι η «άγνωστη» κατάσταση.

Η θεωρία αυτή αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο για την αποτίμηση του κινδύνου και της αξιοπιστίας σε εφαρμογές της επιστήμης των μηχανικών όταν δεν είναι δυνατόν να ληφθούν ακριβείς μετρήσεις από πειράματα ή η γνώση που αποκομίζεται εξάγεται με εμπειρικό τρόπο. Μια σημαντική πτυχή αυτής της θεωρίας είναι ο συνδυασμός των ενδείξεων που λαμβάνονται από πολλαπλές πηγές και η μοντελοποίηση της σύγκρουσης μεταξύ τους. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη θεωρία αυτή καθώς και για τις διαφορές της από την κλασική θεωρία πιθανοτήτων δίνονται στην συνέχεια.

4.4.1.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η επιστημονική κοινότητα καθώς και η κοινότητα των μηχανικών άρχισε να αναγνωρίζει την συνεισφορά του ορισμού πολλαπλών τύπων αβεβαιότητας. Εν μέρει η σε βάθος μελέτη του ρόλου της αβεβαιότητας έγινε δυνατή χάρη στη σημαντική πρόοδο των υπολογιστών και της αύξησης της υπολογιστικής ισχύος τους. Καθώς τα συστήματα γίνονται υπολογιστικά καλύτερα, έτσι ώστε να μπορούν να χειρίζονται πολύπλοκες αναλύσεις, γίνονται αντιληπτοί οι περιορισμοί της εφαρμογής ενός μόνο μαθηματικού πλαισίου (παραδοσιακά της θεωρίας πιθανοτήτων) το οποίο χρησιμοποιείται για την

αναπαράσταση της αβεβαιότητας. Η διττή φύση της αβεβαιότητας περιγράφεται με τους παρακάτω ορισμούς από τον Helton [91]:

- **Τυχαία αβεβαιότητα (aleatory uncertainty)** – ο τύπος της αβεβαιότητας που προκύπτει από το γεγονός ότι ένα σύστημα μπορεί να συμπεριφέρεται με τυχαίο τρόπο, γνωστή και ως στοχαστική αβεβαιότητα, αβεβαιότητα τύπου A, μεταβλητότητα, αντικειμενική αβεβαιότητα.
- **Επιστημονική αβεβαιότητα (epistemic uncertainty)** – ο τύπος αβεβαιότητας ο οποίος προκύπτει από την έλλειψη γνώσης για ένα σύστημα και είναι κτήμα των αναλυτών που διεξάγουν την ανάλυση, γνωστή και ως υποκειμενική αβεβαιότητα, αβεβαιότητα τύπου B, αβεβαιότητα γνώσης της κατάστασης, άγνοια.

Παραδοσιακά χρησιμοποιούταν η θεωρία πιθανοτήτων για να χαρακτηρίσει και τους δυο παραπάνω τύπους αβεβαιότητας. Είναι κοινά αποδεκτό ότι η τυχαία αβεβαιότητα αντιμετωπίζεται βέλτιστα με τη χρήση της συχνοτικής προσέγγισης η οποία σχετίζεται με την παραδοσιακή θεωρία πιθανοτήτων. Παρόλα αυτά, η τρέχουσα κριτική που γίνεται στο πιθανοτικό χαρακτηρισμό της αβεβαιότητας ισχυρίζεται ότι η παραδοσιακή θεωρία πιθανοτήτων δεν είναι ικανή να συλλάβει την επιστημονική αβεβαιότητα. Η εφαρμογή των παραδοσιακών μεθόδων της κλασικής θεωρίας των πιθανοτήτων στην επιστημονική ή αλλιώς υποκειμενική αβεβαιότητα είναι συχνά γνωστή ως πιθανότητα Bayes. Μια πιθανοτική ανάλυση προϋποθέτει ότι ο αναλυτής έχει πληροφορίες για τις πιθανότητες όλων των ενδεχομένων. Όταν αυτό δεν είναι εφικτό, συχνά χρησιμοποιείται η συνάρτηση της ομοιόμορφης κατανομής, γεγονός που δικαιολογείται με βάση την αρχή της ανεπαρκούς αιτιολόγησης (Principle of Insufficient Reason) του Laplace [92]. Αυτό στην ουσία σημαίνει ότι όλα τα απλά ενδεχόμενα, των οποίων η κατανομή πιθανότητας δεν είναι γνωστή σε ένα δοσμένο διάστημα δειγμάτων, είναι ισοπίθανα. Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε το ενδεχόμενο της βλάβης ενός συστήματος, στο οποίο υπάρχουν τρία πιθανά εξαρτήματα τα οποία μπορεί να είναι υπεύθυνα για την βλάβη αυτή. Ένας ειδικός στην αξιολόγηση ενός εξαρτήματος αναθέτει μια πιθανότητα αποτυχίας του εξαρτήματος αυτού ίση με 30% (εξάρτημα A). Ο ειδικός αυτός δεν γνωρίζει τίποτα για τις άλλες δυο πιθανές πηγές της βλάβης (εξαρτήματα B και Γ). Μια παραδοσιακή ανάλυση πιθανότητας που ακολουθεί την αρχή της ανεπαρκούς αιτιολόγησης θα μπορούσε να αναθέσει μια πιθανότητα αποτυχίας ίση με 35% σε κάθε ένα από τα δυο εναπομείναντα εξαρτήματα (B και Γ). Αυτό θα ήταν ένα πολύ ακριβές συμπέρασμα για την πιθανότητα αποτυχίας αυτών των δυο εξαρτημάτων στην βάση της πλήρους άγνοιας, όσον αφορά αυτά τα εξαρτήματα, από την πλευρά του συγκεκριμένου ειδικού.

Μια επιπρόσθετη παραδοχή στην κλασική θεωρία πιθανοτήτων προέρχεται από το αξίωμα της προσθετικότητας (additivity), σύμφωνα με το οποίο όλες οι πιθανότητες οι οποίες ικανοποιούν συγκεκριμένες ιδιότητες έχουν άθροισμα ίσον με τη μονάδα. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η γνώση ενός ενδεχομένου συνεπάγεται και τη γνώση του συμπληρωματικού του, δηλαδή η γνώση της πιθανότητας πραγματοποίησης ενός γεγονότος μπορεί να μεταφραστεί και σαν γνώση της πιθανότητας να μη συμβεί το συγκεκριμένο γεγονός. Εάν ένας ειδικός αποφανθεί ότι κάποιο σύστημα δεν λειτουργεί εξαιτίας κάποιου συγκεκριμένου εξαρτήματος με πιθανότητα 30%, τότε σημαίνει αυτό αυτόματα ότι ο ίδιος ειδικός πιστεύει

ότι το σύστημα αυτό θα λειτουργήσει εξαιτίας του εξαρτήματος αυτού σε ποσοστό 70%; Το παράδειγμα αυτό εκφράζει τη δυσκολία που υπάρχει στη μοντελοποίηση οποιασδήποτε αβεβαιότητας που σχετίζεται με την υποκειμενική εκτίμηση ενός ειδικού. Επομένως, οι υποθέσεις της προσθετικότητας και της αρχής της ανεπαρκούς αιτιολόγησης μπορεί να είναι κατάλληλες για μοντελοποίηση τυχαίων γεγονότων που σχετίζονται με την τυχαία αβεβαιότητα (aleatoric uncertainty), αλλά αμφισβητούνται όταν εφαρμόζονται σε θέματα γνώσης ή πίστης όπως συμβαίνει στην περίπτωση της επιστημονικής αβεβαιότητας.

Σαν συνέπεια όλων των παραπάνω, οι πρακτικοί μαθηματικοί έχουν ερευνήσει πολύ πιο γενικές αναπαραστάσεις της αβεβαιότητας για να ανταπεξέλθουν σε συγκεκριμένες καταστάσεις που σχετίζονται με την επιστημονική αβεβαιότητα. Παραδείγματα τέτοιου είδους καταστάσεων περιλαμβάνουν τα εξής:

- Όταν υπάρχουν λίγες πληροφορίες για τον υπολογισμό μιας πιθανότητας ή
- Όταν οι πληροφορίες αυτές δεν είναι τόσο συγκεκριμένες, είναι ασαφείς, ή ακόμα και αντιφατικές.

Η ανάλυση τέτοιων καταστάσεων μπορεί να απαιτείται, για παράδειγμα, σε μία αποτίμηση ρίσκου αλλά η θεωρία πιθανοτήτων δεν μπορεί να χειριστεί τέτοιες πληροφορίες. Όπου δεν είναι δυνατόν να χαρακτηριστεί η αβεβαιότητα με ένα ακριβές μέτρο, όπως είναι μια ακριβής πιθανότητα, τότε είναι λογικό σαν μέτρο της πιθανότητας να δίνεται ένα διάστημα ή ένα σύνολο.

Αυτός ο χαρακτηρισμός ενός μέτρου πιθανότητας σαν διάστημα ή σύνολο έχει τρεις σημαντικές επιπτώσεις:

1. Δεν είναι αναγκαία η εξαγωγή μιας ακριβούς μέτρησης από έναν ειδικό ή ένα πείραμα αν δεν είναι ρεαλιστικό ή εφικτό να γίνει αυτό.
2. Δεν επιβάλλεται η αρχή της ανεπαρκούς αιτιολόγησης. Μπορούν να γίνουν προτάσεις για την πιθανότητα πολλαπλών γεγονότων μαζί, χωρίς να χρειάζεται η προσφυγή σε υποθέσεις για τις πιθανότητες των μεμονωμένων γεγονότων κάτω από άγνοια.
3. Δεν επιβάλλεται το αξίωμα της προσθετικότητας. Δεν χρειάζεται τα μέτρα να δίνουν άθροισμα μονάδα. Όταν συμβαίνει αυτό, τότε αντιστοιχεί σε παραδοσιακή αναπαράσταση πιθανότητας. Όταν το άθροισμα είναι μικρότερο από τη μονάδα, τότε υπονοείται μια ασυμβατότητα μεταξύ των πολλαπλών πηγών πληροφορίας, π.χ. πολλαπλοί αισθητήρες που παρέχουν αντιφατικές πληροφορίες. Όταν το άθροισμα είναι μεγαλύτερο της μονάδας, τότε υπονοείται ένα συνεργατικό φαινόμενο μεταξύ των πολλαπλών πηγών πληροφορίας, π.χ. πολλαπλοί αισθητήρες που παρέχουν την ίδια πληροφορία.

Επειδή υπάρχουν περισσότερα του ενός είδη αβεβαιότητας και η θεωρία πιθανοτήτων ίσως δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε κατάσταση που περιέχει αβεβαιότητα, πολλές γενικές θεωρίες που βασίζονται στην αβεβαιότητα της πληροφορίας έχουν αναπτυχθεί. Μία από αυτές τις θεωρίες είναι και η θεωρία αποδείξεων (evidence theory) των Dempster-Shafer.

Η ύπαρξη πολλών διαφορετικών θεωριών για τη διαχείριση των πληροφοριών που περιέχουν αβεβαιότητα δημιουργούν προβλήματα στον αναλυτή ο οποίος θέλει να ασχοληθεί με την επιστημονική

αβεβαιότητα, δηλαδή, ποια μέθοδο πρέπει να εφαρμόσει σε μια συγκεκριμένη περίπτωση. Παρόλο που αυτή είναι μια ερώτηση υπό εξέταση, η απόφαση του εκάστοτε αναλυτή βασίζεται στα πλεονεκτήματα που έχει η κάθε θεωρία, το πόσο ανεπτυγμένη είναι καθώς και η έως τώρα χρήση της σε πρακτικές εφαρμογές. Κάποιοι από τους λόγους που οδήγησαν στην επιλογή της θεωρίας Dempster-Shafer σε αυτό το κεφάλαιο είναι οι ακόλουθοι:

- Ο σχετικά υψηλός βαθμός θεωρητικής ανάπτυξης σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μη παραδοσιακές θεωρίες που σχετίζονται με την αβεβαιότητα.
- Η σχέση που υπάρχει μεταξύ της θεωρίας Dempster-Shafer με την παραδοσιακή θεωρία πιθανότητας και τη θεωρία συνόλων.
- Η μεγάλη ποικιλία παραδειγμάτων εφαρμογών της θεωρίας αυτής στον κλάδο των μηχανικών την τελευταία δεκαετία.
- Η ευελιξία της θεωρίας αυτής να αναπαριστά και να συνδυάζει διαφορετικού τύπου ενδείξεις που αποκτώνται από πολλαπλές πηγές.

Συμπερασματικά, η θεωρία των Dempster-Shafer είναι ανώτερη από τη θεωρία πιθανοτήτων όταν υπάρχει αβεβαιότητα στα δεδομένα. Παρέχει ένα διάστημα για την αναπαράσταση της αβεβαιότητας και όχι ένα μόνο σημείο όπως γίνεται στην κλασική θεωρία πιθανοτήτων. Επίσης, ένα σημαντικό πλεονέκτημα της θεωρίας αυτής είναι ότι τα δεδομένα από τους αισθητήρες μπορεί να περιέχουν διαφορετικά επίπεδα αφαιρετικότητας (abstraction), δηλαδή ο κάθε αισθητήρας επιτρέπεται να συνεισφέρει πληροφορίες στο δικό του επίπεδο λεπτομέρειας. Επιπλέον, κάποια άλλα πλεονεκτήματα της θεωρίας των Dempster-Shafer είναι ότι οι υποθέσεις που σχηματίζονται δεν χρειάζεται να είναι αμοιβαίως αποκλειόμενες και οι πιθανότητες που εμπλέκονται μπορεί να είναι εμπειρικές ή υποκειμενικές.

4.4.1.2 Σύστημα συλλογιστικής Dempster-Shafer

Η θεωρία αποδείξεων μπορεί να θεωρηθεί σαν μια γενική επέκταση της θεωρίας του Bayes. Μπορεί να χειριστεί την απόλυτη άγνοια και την υποκειμενικότητα των ενδεχομένων τα οποία συνδυάζονται σε ένα σύστημα σύντηξης που λειτουργεί με βάση αυτή τη θεωρία. Συγκρινόμενη με την θεωρία του Bayes, η θεωρία αποδείξεων των Dempster-Shafer φαίνεται να είναι πιο κοντά στην ανθρώπινη αντίληψη και στην ανθρώπινη συλλογιστική διαδικασία. Η ικανότητα της να αναθέτει αβεβαιότητα και άγνοια σε προτάσεις την κάνει ένα ισχυρό εργαλείο για την αντιμετώπιση ενός μεγάλου αριθμού προβλημάτων, τα οποία αλλιώς θα φαινόταν δισεπίλυτα.

Υπάρχουν τρεις βασικές συναρτήσεις στη θεωρία Dempster-Shafer: η συνάρτηση βασικής πιθανότητας ανάθεσης (basic probability assignment function – BPA ή m), η συνάρτηση εμπιστοσύνης (Belief function – Bel) και η συνάρτηση αληθοφάνειας (Plausibility function – Pl).

Η βασική πιθανότητα ανάθεσης είναι μια στοιχειώδης έννοια της θεωρίας αποδείξεων. Σε γενικές γραμμές, ο όρος “βασική πιθανότητα ανάθεσης” δεν αναφέρεται σε πιθανότητα με την κλασική έννοια. Η BPA συμβολίζεται με m και ορίζει μια αντιστοιχία του δυναμοσυνόλου (power set) στο διάστημα μεταξύ 0 και 1, όπου η BPA του κενού συνόλου είναι 0 και το άθροισμα των BPA όλων των υποσυνόλων του δυναμοσυνόλου είναι 1. Η τιμή της BPA για ένα δεδομένο σύνολο A , η οποία παριστάνεται με $m(A)$, εκφράζει το ποσοστό όλων των σχετικών και διαθέσιμων στοιχείων που υποστηρίζουν τον ισχυρισμό ότι ένα συγκεκριμένο στοιχείο του X (το οικουμενικό σύνολο – universal set) ανήκει στο σύνολο A αλλά σε κανένα συγκεκριμένο υποσύνολο του A [93]. Η τιμή της $m(A)$ αφορά μόνο το σύνολο A και δεν κάνει κανένα πρόσθετο ισχυρισμό για τα υποσύνολα του A . Όλες οι επιπλέον αποδείξεις για τα υποσύνολα του A παριστάνονται από άλλη BPA, δηλαδή αν το B είναι υποσύνολο του A τότε $m(B)$ θα είναι η BPA του υποσυνόλου B . Η περιγραφή του m μπορεί να γίνει με τις ακόλουθες τρεις εξισώσεις:

$$m : P(X) \rightarrow [0,1] \quad (4.5)$$

$$m(\emptyset) = 0 \quad (4.6)$$

$$\sum_{A \in P(X)} m(A) = 1 \quad (4.7)$$

όπου $P(X)$ είναι το δυναμοσύνολο του X , \emptyset είναι το κενό σύνολο και A είναι ένα σύνολο του δυναμοσυνόλου $A \in P(X)$.

Από την βασική πιθανότητα ανάθεσης μπορούν να οριστούν τα άνω και τα κάτω όρια ενός διαστήματος. Το διάστημα αυτό περιέχει την ακριβή πιθανότητα ενός συνόλου ενδιαφέροντος (με την κλασική έννοια) και είναι φραγμένο από δύο μη προσθετικά συνεχή μέτρα που ονομάζονται εμπιστοσύνη (Belief) και αληθοφάνεια (Plausibility). Το κάτω όριο για ένα σύνολο A , το οποίο είναι η εμπιστοσύνη, ορίζεται ως το άθροισμα όλων των βασικών πιθανοτήτων ανάθεσης των κατάλληλων υποσυνόλων B του συνόλου ενδιαφέροντος A ($B \subseteq A$). Το άνω όριο, δηλαδή η αληθοφάνεια, είναι το άθροισμα όλων των βασικών πιθανοτήτων ανάθεσης των συνόλων B που τέμνονται με το σύνολο ενδιαφέροντος A ($B \cap A \neq \emptyset$). Ο υπολογισμός της εμπιστοσύνης και της αληθοφάνειας γίνεται με την χρήση των παρακάτω συναρτήσεων:

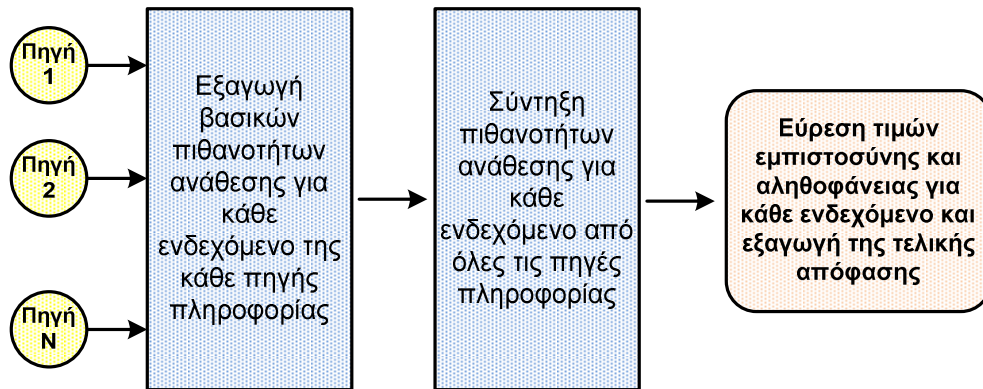
$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (4.8)$$

$$Pl(A) = \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m(B) \quad (4.9)$$

Σε ένα σύστημα συλλογιστικής Dempster-Shafer πρέπει με κάποιο κανόνα να συνδυαστούν οι διάφορες τιμές των βασικών πιθανοτήτων ανάθεσης για να εξαχθεί το τελικό συμπέρασμα. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί κανόνες στη βιβλιογραφία, ο καθένας με τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα [94]. Εδώ ο υπολογισμός της συνδυαστικής πιθανότητας ανάθεσης γίνεται με την βοήθεια της παρακάτω σχέσης:

$$m_1 \oplus m_2(C) = \frac{\sum_{A \cap B = C} m_1(A) \cdot m_2(B)}{1 - \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A) \cdot m_2(B)} \quad C = \emptyset \quad (4.10)$$

Η λογική που ακολουθείται για την εξαγωγή αποφάσεων με βάση ένα σύστημα συλλογιστικής Dempster-Shafer φαίνεται στο σχήμα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 35.



Εικόνα 35: Σύστημα συλλογιστικής Dempster-Shafer

Το σύστημα συλλογιστικής Dempster-Shafer που θα χρησιμοποιηθεί και στην συνέχεια, π.χ. για τον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς, θα έχει ως εισοδο όλα τα δεδομένα που θα προέρχονται από τις διαφορετικές πηγές πληροφορίας. Με βάση τις συναρτήσεις βασικής πιθανότητας ανάθεσης που θα έχουν οριστεί, θα εξαγονται οι μάζες απόδειξης (evidence masses) για κάθε πηγή:

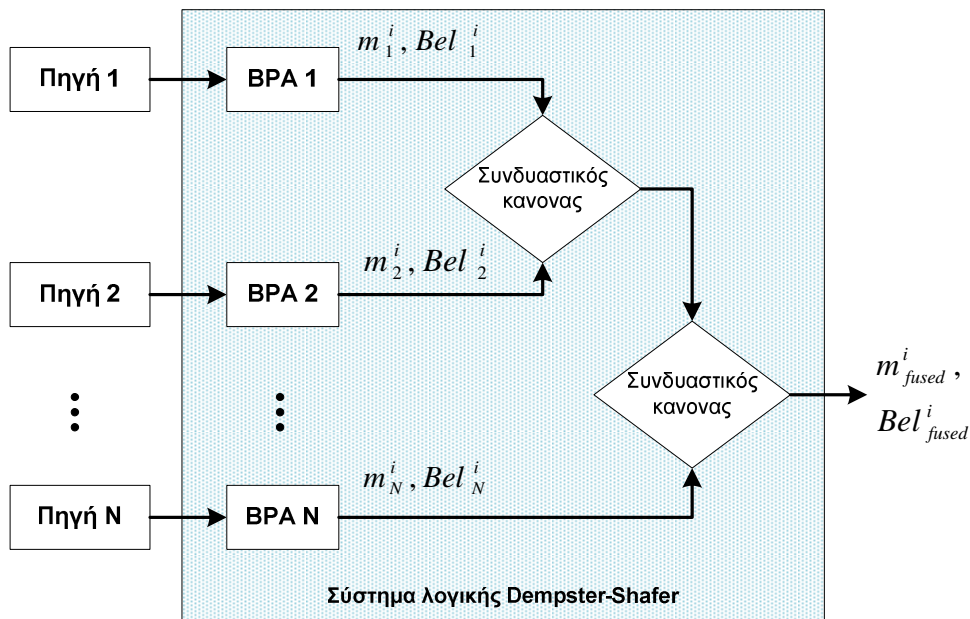
$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & \cdots & m_{1S} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_N & \cdots & m_{NS} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

όπου S είναι ο αριθμός των πηγών πληροφορίας, N είναι ο αριθμός των καταστάσεων και $m_{i,j}$ είναι το βάρος απόδειξης της κατάστασης i με βάση τις πληροφορίες της πηγής j .

Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τον συνδυαστικό κανόνα του Dempster-Shafer, που δίνεται στην εξίσωση 4.10 υπολογίζονται τα συνδυασμένα βάρη:

$$M_F = [m_1^f \quad \cdots \quad m_N^f]^T \quad (4.12)$$

Τέλος, χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.8 υπολογίζονται οι τιμές εμπιστοσύνης για κάθε πρόταση και εξάγεται η τελική πρόταση χρησιμοποιώντας ένα σύνολο διατυπωμένων κανόνων. Η διαδικασία σύντηξης με τη βοήθεια της θεωρίας των Dempster-Shafer φαίνεται στην Εικόνα 36.



Εικόνα 36: Διαδικασία σύντηξης με Dempster-Shafer

4.4.2 Αλγόριθμος πρόβλεψης μελλοντικής τροχιάς

Η επιτυχημένη αντίληψη του οδικού περιβάλλοντος είναι το πιο δύσκολο έργο ενός συστήματος ενεργητικής ασφαλείας. Η αποτίμηση της κατάστασης (situation assessment) αποτελεί το υψηλότερο επίπεδο αφαίρεσης στη διαδικασία αντίληψης και ο ρόλος της είναι η εξαγωγή εμπλουτισμένων πληροφοριών που αφορούν την υπό εξέλιξη κατάσταση από την παρακολούθηση των σχέσεων μεταξύ αυτοκινήτων καθώς και του στατικού οδικού δικτύου. Με τον τρόπο αυτό, το σύστημα μπορεί να διατηρήσει την επίγνωση του περιβάλλοντος καθώς και της εξελισσόμενης κατάστασης στο δρόμο. Η πρόβλεψη της μελλοντικής τροχιάς αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της αποτίμησης της κατάστασης. Ο υπολογισμός της μελλοντικής τροχιάς όλων των αυτοκινήτων δίνει τη δυνατότητα στο υποκείμενο αυτοκίνητο να καταλάβει τη μελλοντική εξέλιξή τους στο οδικό περιβάλλον, να λάβει την καταλληλότερη απόφαση με γνώμονα την ασφάλεια και να προειδοποιήσει τον οδηγό σε περίπτωση επικίνδυνων καταστάσεων.

Σε όλες σχεδόν τις εφαρμογές που σχετίζονται με την οδική ασφάλεια η εκτίμηση της μελλοντικής τροχιάς για κάθε αυτοκίνητο παίζει σημαντικό ρόλο. Όταν οι τροχιές αυτές υπολογιστούν τότε μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους και αν τέμνονται οι οδηγοί των αυτοκινήτων αυτών μπορούν να ενημερωθούν εγκαίρως ώστε να αποφευχθούν πιθανές δυσάρεστες καταστάσεις. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που ένα αυτοκίνητο φρενάρει απότομα, τα αυτοκίνητα που ακολουθούν θα συγκρίνουν τις μελλοντικές τροχιές τους με αυτή του αυτοκινήτου που φρενάρει για να διαπιστώσουν εάν η πορεία τους είναι προς την κατεύθυνση της πέδησης του προπορευόμενου αυτοκινήτου. Αν όχι, ο οδηγός δεν θα πρέπει να προειδοποιείται για κάτι που δεν τον αφορά και να αποσπάται η προσοχή του από την οδήγηση, η οποία είναι μια πολύ απαιτητική εργασία.

Οι αλγόριθμοι πρόβλεψης της μελλοντικής τροχιάς βασίζονται κυρίως στην ενημέρωση της τρέχουσας κατάστασης ενός αυτοκινήτου με τη χρήση του κατάλληλου μοντέλου κίνησης. Σε περίπτωση ενός γραμμικού δυναμικού μοντέλου η μελλοντική τροχιά θα υπολογίζεται σύμφωνα με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$x(k+1) = A(k) \cdot x(k) \quad (4.13)$$

$$P(k+1) = A(k) \cdot P(k) \cdot A^T(k), \quad k = 1, \dots, N-1 \quad (4.14)$$

όπου x είναι το διάνυσμα κατάστασης, A είναι ο πίνακας μετάβασης και P είναι ο πίνακας συνδιακύμανσης του σφάλματος εκτίμησης. Όταν το μοντέλο είναι μη γραμμικό τότε η μελλοντική κατάσταση υπολογίζεται απευθείας χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του μοντέλου κίνησης:

$$x(k+1) = F[x(k)] \quad (4.15)$$

Σε αυτό το κεφάλαιο προτείνεται και περιγράφεται λεπτομερώς ένας καινοτόμος αλγόριθμος πρόβλεψης της μελλοντικής τροχιάς. Ο ίδιος αλγόριθμος χρησιμοποιείται τόσο για το υποκείμενο αυτοκίνητο όσο και για τα άλλα αυτοκίνητα στο οδικό περιβάλλον. Ωστόσο, η επίδοση του αλγορίθμου είναι ανώτερη όταν ο υπολογισμός αφορά το υποκείμενο αυτοκίνητο καθώς οι αναγκαίες πληροφορίες για τον υπολογισμό αυτό είναι άμεσα διαθέσιμες από το δίαυλο CAN. Στην περίπτωση των άλλων αυτοκινήτων ο υπολογισμός αυτός γίνεται αφού προηγηθεί η ιχνηλασία από τους αισθητήρες του υποκείμενου αυτοκινήτου και η συνεργατική συσχέτιση των αποτελεσμάτων της ιχνηλασίας με πληροφορίες που είναι διαθέσιμες από το VANET, διαδικασία που λαμβάνει χώρα στο υποκείμενο αυτοκίνητο. Οι τελικές εκτιμήσεις για την κατάσταση των γύρω αυτοκινήτων είναι αρκετά ακριβής, ύστερα από τη χωρική και χρονική ευθυγράμμιση και τη διαδικασία της σύντηξης.

Ο αλγόριθμος για τον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς χωρίζεται σε δύο μέρη: α) την εκτίμηση της μελλοντικής τροχιάς με ένα συγκεκριμένο μοντέλο κίνησης από ένα σύνολο προιαθορισμένων μοντέλων και β) την εκτίμηση της μελλοντικής τροχιάς με βάση το πιο πιθανό μοντέλο κίνησης σε κάθε κύκλο επεξεργασίας σύμφωνα με την έξοδο ενός συστήματος συλλογιστικής Dempster-Shafer.

Και στις δύο περιπτώσεις, η δομή της τροχιάς είναι πάντοτε η ίδια. Είναι ένα σύνολο σημείων, καθένα από τα οποία περιλαμβάνει πληροφορίες για τη θέση και την ταχύτητά του:

$$future_path = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n \\ v_{x1} & v_{x2} & \dots & v_{xn} \\ v_{y1} & v_{y2} & \dots & v_{yn} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

όπου x είναι η θέση στο διαμήκη άξονα, y είναι η θέση στον εγκάρσιο άξονα, v_x είναι η ταχύτητα στον διαμήκη άξονα, v_y η ταχύτητα στον εγκάρσιο άξονα και n είναι ο αριθμός των σημείων της κάθε τροχιάς. Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται είναι το τοπικό σύστημα συντεταγμένων του υποκείμενου αυτοκινήτου, όπου ο άξονας y δείχνει προς τον Βορρά και η αρχή του συστήματος συντεταγμένων είναι η αρχική θέση του υποκείμενου αυτοκινήτου, δηλαδή το σημείο στο οποίο άρχισε να κινείται. Περισσότερες

λεπτομέρειες σχετικά με τα χρησιμοποιούμενα συστήματα συντεταγμένων και τις μετατροπές από το ένα στο άλλο μπορεί να βρει ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης στο παράρτημα του [87].

A. Εκτίμηση της τροχιάς με βάση ένα μοντέλο κίνησης

Σαν πρώτο βήμα η μελλοντική τροχιά υπολογίζεται με τη χρησιμοποίηση ενός από τα ακόλουθα μοντέλα κίνησης:

- σταθερής ταχύτητας (CV),
- σταθερής επιτάχυνσης (CA),
- σταθερής γωνιακής ταχύτητας (CTR) και
- σταθερής γωνιακής ταχύτητας και εφαπτομενικής επιτάχυνσης (CTRA).

Περισσότερες πληροφορίες για τα μοντέλα αυτά αναφέρονται στο προηγούμενο κεφάλαιο της διατριβής καθώς και στα [3, 63]. Αυτά τα μοντέλα κίνησης χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές οδικής ασφάλειας για την αναπαράσταση της κίνησης των αυτοκινήτων και τα ίδια μοντέλα χρησιμοποιούνται και στη συνέχεια στο σύστημα συλλογιστικής Dempster-Shafer.

Το διάνυσμα κατάστασης, που είναι στην ουσία η έξοδος του UKF φίλτρου που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και χρησιμοποιείται ως η είσοδος για τον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς με τα διάφορα μοντέλα κίνησης είναι το ακόλουθο:

$$state_{UKF} = [x \quad y \quad v \quad a_t \quad h \quad \omega]^T \quad (4.17)$$

όπου x είναι η διαμήκης θέση, y η εγκάρσια θέση, v η ταχύτητα του αυτοκινήτου, a_t η εφαπτομενική επιτάχυνση, h η κατεύθυνση και ω η γωνιακή ταχύτητα.

Το μοντέλο CTRA περιγράφει με έναν πιο ρεαλιστικό τρόπο την πραγματική κίνηση ενός αυτοκινήτου, διότι λαμβάνει υπόψη τόσο τις τιμές της γωνιακής ταχύτητας όσο και αυτές της επιτάχυνσης. Επιπλέον, είναι το πιο περίπλοκο από τα υπόλοιπα μοντέλα κίνησης. Οι εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων (με αρχή του συστήματος συντεταγμένων το γεωμετρικό κέντρο του αυτοκινήτου), όπου ο διαμήκης άξονας του αυτοκινήτου είναι ο άξονας x , για το CTRA μοντέλο, είναι οι ακόλουθες:

$$x(k+1) = x(k) + [v_x(k) \cdot \sin(\omega T) + v_y(k) \cdot (\cos(\omega T) - 1)] / \omega + \left[\begin{array}{l} a_t \cdot (\cos(h(k) + \omega T) - \cos(h(k))) + \\ + a_t \cdot \omega T \cdot \sin(h(k) + \omega T) \end{array} \right] / \omega^2 \quad (4.18)$$

$$y(k+1) = y(k) + [v_y(k) \cdot \sin(\omega T) - v_x(k) \cdot (\cos(\omega T) - 1)] / \omega + \left[\begin{array}{l} a_t \cdot (\sin(h(k) + \omega T) - \sin(h(k))) - \\ - a_t \cdot \omega T \cdot \cos(h(k) + \omega T) \end{array} \right] / \omega^2 \quad (4.19)$$

$$v_x(k+1) = v_x(k) \cdot \cos(\omega T) - v_y(k) \cdot \sin(\omega T) + a_t \cdot T \cdot \cos(h(k) + \omega T) \quad (4.20)$$

$$v_y(k+1) = v_y(k) \cdot \cos(\omega T) + v_x(k) \cdot \sin(\omega T) + a_t \cdot T \cdot \sin(h(k) + \omega T) \quad (4.21)$$

$$h(k+1) = h(k) + \omega T \quad (4.22)$$

B. Εκτίμηση της τροχιάς με βάση το σύστημα συλλογιστικής Dempster-Shafer

Σαν δεύτερο βήμα ένα σύστημα συλλογιστικής Dempster-Shafer [89,90], αναπτύσσεται με σκοπό να εντοπίσει το καταλληλότερο μοντέλο κίνησης σε κάθε κύκλο επεξεργασίας. Οι πηγές πληροφορίας του συστήματος αυτού είναι οι τιμές της γωνιακής ταχύτητας, της επιτάχυνσης και της καμπυλότητας του δρόμου. Οι δύο πρώτες εξάγονται από τον δίαυλο CAN του αυτοκινήτου ενώ η τρίτη προέρχεται από τους ψηφιακούς χάρτες. Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα εισόδου, η έξοδος του συστήματος θα είναι το πιο πιθανό μοντέλο κίνησης στον τρέχον κύκλο επεξεργασίας μαζί με τις αντίστοιχες τιμές εμπιστοσύνης και αληθοφάνειας.

Κάθε μία από τις πηγές πληροφορίας, οι οποίες έχουν επιλεγεί ως είσοδος στο σύστημα συλλογιστικής Dempster-Shafer, παίζει έναν συγκεκριμένο ρόλο στην επιλογή του καλύτερου μοντέλου κίνησης. Η τιμή της επιτάχυνσης υποδηλώνει εάν το αυτοκίνητο κινείται με σταθερή ταχύτητα, επιταχύνει ή επιβραδύνει. Τα μοντέλα τα οποία λαμβάνουν υπόψη την επιτάχυνση είναι το CA και το CTRA. Η τιμή της καμπυλότητας του δρόμου δείχνει αν το αυτοκίνητο κινείται σε καμπύλη ή ευθεία οδό. Τα μοντέλα που είναι κατάλληλα για ευθύγραμμους δρόμους είναι το CV και το CA, ενώ για τους κυρτούς δρόμους εφαρμόζονται τα CTR και CTRA. Τέλος, η τιμή της γωνιακής ταχύτητας, χρησιμοποιείται για να δηλώσει εάν το αυτοκίνητο εκτελεί κάποιον ελιγμό ενώ κινείται σε ένα ευθύγραμμο τμήμα της οδού καθώς και πόσο απότομα ο οδηγός στρίβει σε ένα κυρτό οδικό τμήμα.

Ο τρόπος που λειτουργεί το παραπάνω σύστημα συλλογιστικής μπορεί γίνει καλύτερα κατανοητό με το ακόλουθο παράδειγμα. Εάν το αυτοκίνητο κινείται σε ευθύγραμμο δρόμο με σταθερή ταχύτητα, τότε το μοντέλο CV θα επιλεγεί. Αν το αυτοκίνητο βρίσκεται κοντά σε μια στροφή τότε το CTR ή CTRA μοντέλο θα επιλέγονται με βάση και την τρέχουσα τιμή της επιτάχυνσης.

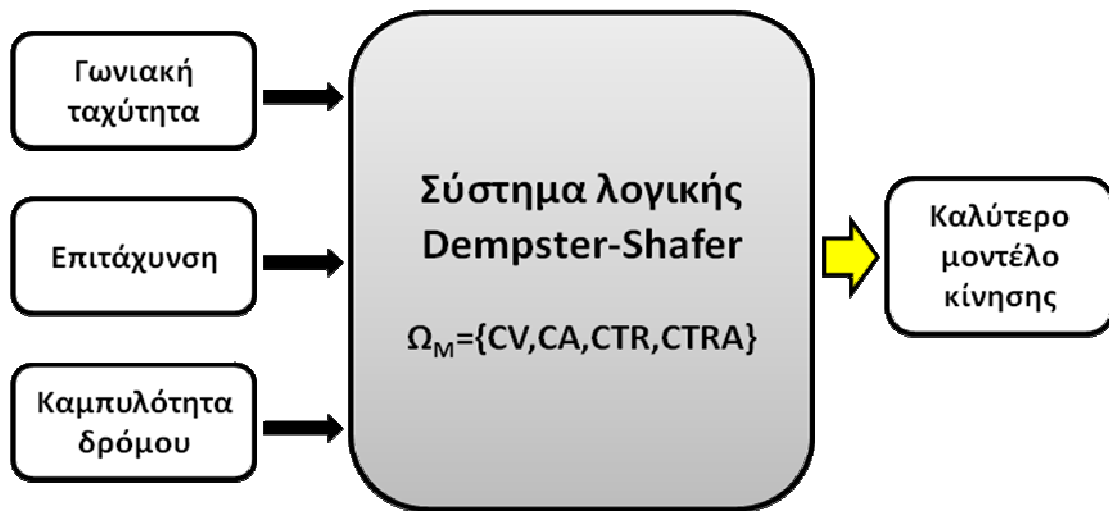
Ο χώρος των καταστάσεων (space of discernment) του Dempster-Shafer συστήματος συλλογιστικής που χρησιμοποιείται εδώ είναι:

$$\Omega_M = \{CV, CA, CTR, CTRA\} \quad (4.23)$$

όπου το μοντέλο CTRA θεωρείται ως η ένωση των μοντέλων CA και CTR:

$$CTRA = \{CA, CTR\} \quad (4.24)$$

Στην Εικόνα 37 οι πηγές πληροφορίας, ο χώρος καταστάσεων και η έξοδος του συστήματος συλλογιστικής Dempster-Shafer μπορούν να παρατηρηθούν.



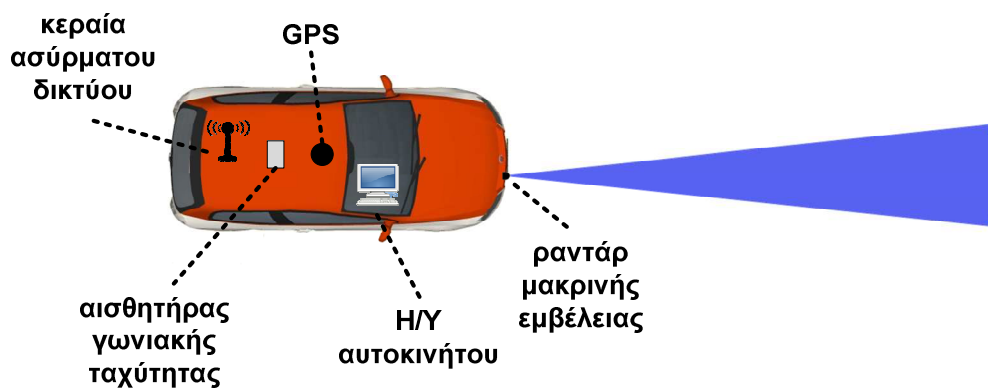
Εικόνα 37: Σύστημα συλλογιστικής Dempster-Shafer για επιλογή μοντέλου κίνησης

4.5 Μετρήσεις και αποτελέσματα

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν την επίδοση του αλγορίθμου για τον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς του αυτοκινήτου, τα οποία χωρίζονται σε δύο κυρίως τμήματα. Το πρώτο αφορά καθαρά την αποτίμηση του αλγορίθμου, ενώ το δεύτερο εξετάζει την επίδοση του αλγορίθμου αυτού στα πλαίσια της εφαρμογής EEBL. Επίσης, στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι το πρώτο τμήμα των αποτελεσμάτων χωρίζεται σε δύο επιπλέον μέρη: μετρήσεις με τη χρήση του ερευνητικού αυτοκινήτου της ομάδας και μετρήσεις στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος SAFESPOT [37].

Η ακόλουθη ορολογία εφαρμόζεται για τα αυτοκίνητα τα οποία εμφανίζονται στις δοκιμές και χρησιμοποιείται τόσο στις μετρήσεις που αφορούν καθαρά την αποτίμηση του αλγορίθμου όσο και σε αυτές που αφορούν την επίδοσή του στα πλαίσια της EEBL εφαρμογής:

- *Αυτοκίνητο A ή υποκείμενο αυτοκίνητο*: ένα πλήρως εξοπλισμένο ερευνητικό αυτοκίνητο με μια πλειάδα από αισθητήρες. Ωστόσο, για το σκοπό του κεφαλαίου αυτού οι αισθητήρες που έχουν ενδιαφέρον είναι ένα ραντάρ μακρινής εμβέλειας που καλύπτει την μπροστινή περιοχή, ένας GPS δέκτης, αισθητήρες για μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης, μια μονάδα ασύρματης επικοινωνίας και ένας ενσωματωμένος Η/Υ ο οποίος τρέχει την πλατφόρμα για συλλογή και επεξεργασία δεδομένων (βλέπε Εικόνα 38).
- *Αυτοκίνητο B*: ένα μερικώς εξοπλισμένο αυτοκίνητο με έναν αισθητήρα GPS, αισθητήρες για μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης, μια μονάδα ασύρματης επικοινωνίας και έναν φορητό Η/Υ ο οποίος τρέχει την πλατφόρμα για συλλογή και επεξεργασία δεδομένων.
- *Αυτοκίνητο C*: ένα συμβατικό Ι.Χ. αυτοκίνητο το οποίο δεν είναι εξοπλισμένο.



Εικόνα 38: Υποκείμενο αυτοκίνητο (αυτοκίνητο A)

Στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί ότι η επεξεργαστική ισχύς των υπολογιστών, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, καθώς και η ανάπτυξη των αλγορίθμων και των βιβλιοθηκών φιλτραρίσματος στην γλώσσα προγραμματισμού C++ εγγυώνται την λειτουργία του αλγορίθμου για τον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς σε πραγματικό χρόνο. Ο κάθε κύκλος εκτέλεσης του αλγορίθμου για τον υπολογισμό των μελλοντικών τροχιών των δύο εμπλεκόμενων αυτοκινήτων (του A και του B) μετρήθηκε λιγότερο από 15 ms.

4.5.1 Αποτελέσματα υπολογισμού μελλοντικής τροχιάς

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η αποτίμηση του αλγορίθμου για τον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς, τόσο του υποκείμενου αυτοκινήτου όσο και των υπόλοιπων αυτοκινήτων, πραγματοποιήθηκε σε δύο διαφορετικά συστήματα: α) με χρήση του ερευνητικού αυτοκινήτου β) στα πλαίσια του ερευνητικού ευρωπαϊκού προγράμματος SAFESPOT. Τα συστήματα αυτά μπορεί να είναι διαφορετικά μεταξύ τους όμως έχουν σημαντικές ομοιότητες τόσο από άποψη αρχιτεκτονικής όσο και εξοπλισμού, γεγονός που επιτρέπει την αυτούσια εφαρμογή του αλγορίθμου πρόβλεψης μελλοντικής τροχιάς και στα δύο αυτά συστήματα. Περισσότερες λεπτομέρειες καθώς και αναλυτικά αποτελέσματα δίνονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

4.5.1.1 Με χρήση ερευνητικού αυτοκινήτου

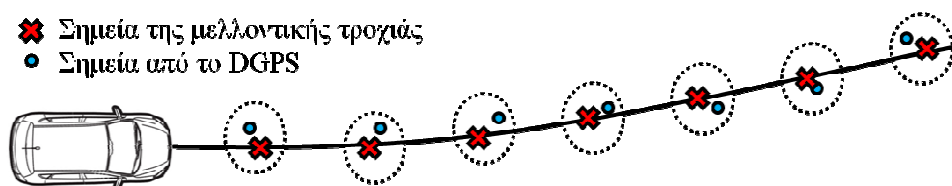
Η αξιολόγηση των εκτιμώμενων μελλοντικών τροχιών πραγματοποιήθηκε σε τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο η μελλοντική τροχιά του υποκείμενου αυτοκινήτου υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τα μοντέλα CV, CA, CTR, CTRA καθώς και το μοντέλο που επιλέχθηκε από την έξοδο του συστήματος συλλογιστικής Dempster-Shafer (DS). Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε μια διαδρομή μέσα στην πολυτεχνειούπολη του

Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), η οποία περιλαμβάνει όχι μόνο ευθείες, αλλά και απότομες και ομαλές στροφές. Η διαδρομή αυτή φαίνεται στην Εικόνα 39.



Εικόνα 39: Διαδρομή για αποτίμηση του αλγορίθμου υπολογισμού μελλοντικής τροχιάς

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των δοκιμών διενεργήθηκε στη συνέχεια στο εργαστήριο, χρησιμοποιώντας ως αληθή δεδομένα (ground truth) για τη θέση του υποκείμενου αυτοκινήτου, τα σημεία που αποθηκεύτηκαν από το σύστημα του διαφορικού GPS (DGPS). Το συγκεκριμένο σύστημα DGPS παρέχει 3 cm ακρίβεια στη θέση. Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η σύγκριση αυτή λαμβάνει χώρα τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο, γιατί τα σημεία διαδρομής αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες θέσεις του DGPS στο χρόνο όπως φαίνεται και στην Εικόνα 40. Οι δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν για την αποτίμηση των αποτελεσμάτων είναι το μέσο σφάλμα απόστασης και η τυπική απόκλιση του κάθε σημείου της τροχιάς από την αντίστοιχη θέση του DGPS.



Εικόνα 40: Διαδικασία αποτίμησης του αλγορίθμου υπολογισμού μελλοντικής τροχιάς

Στον Πίνακα 9 τα αποτελέσματα αφορούν τη μελλοντική τροχιά του υποκείμενου αυτοκινήτου για 4 δευτερόλεπτα μπροστά. Τα αποτελέσματα έδειξαν μια σαφή βελτίωση κατά τη χρήση της εξόδου του συστήματος συλλογιστικής DS. Η βελτίωση αυτή αφορά και την τυπική απόκλιση, η οποία αντιστοιχεί σε μια πιο ομαλή μελλοντική τροχιά σε όλη τη διάρκεια του σεναρίου. Επιπλέον, η πολύ καλή επίδοση του μοντέλου CTRA θα πρέπει να αναφερθεί. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς το CTRA περιγράφει ακριβέστερα την κίνηση του αυτοκινήτου από τα υπόλοιπα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν.

Μοντέλο κίνησης	Μέση τιμή (m)	Τυπική απόκλιση (m)
CV	0.6576	0.5331
CA	0.5431	0.4243
CTR	0.6488	0.5239
CTRA	0.5174	0.4058
DS	0.4567	0.3535

DS: Το μοντέλο που έχει επιλεγεί από το Dempster-Shafer σύστημα συλλογιστικής

Πίνακας 9: Αποτελέσματα μελλοντικής τροχιάς για το υποκείμενο αυτοκίνητο (4 sec)

Στο δεύτερο στάδιο των δοκιμών η μελλοντική τροχιά, χρονικής διάρκειας 4 δευτερολέπτων, του αυτοκινήτου B (μερικώς εξοπλισμένο) υπολογίστηκε με και χωρίς τη χρήση μηνυμάτων από το VANET. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων το αυτοκίνητο B βρισκόταν μπροστά από το υποκείμενο αυτοκίνητο (αυτοκίνητο A) ώστε να είναι σχεδόν συνέχεια στην εμβέλεια του ραντάρ. Στην πρώτη περίπτωση, η είσοδος στον αλγόριθμο πρόβλεψης τροχιάς ήταν το διάγραμμα κατάστασης που υπολογίζεται από τη διαδικασία ιχνηλασίας του ραντάρ. Στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα κατάστασης από το VANET, ύστερα από χωρική και χρονική ευθυγράμμιση. Τέλος, στην τρίτη περίπτωση το διάγραμμα κατάστασης υπολογίστηκε από την σύντηξη των μετρήσεων του ραντάρ και του VANET.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 10. Τα μοντέλα κίνησης που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το σύνολο δοκιμών ήταν τα CV, CA, CTR, CTRA και η έξοδος του συστήματος συλλογιστικής DS. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα κανείς, μπορεί να επικεντρωθεί στην κακή εκτίμηση της μελλοντικής τροχιάς χρησιμοποιώντας μόνο τον αισθητήρα ραντάρ. Αυτό οφείλεται στην κακή εκτίμηση των τιμών της επιτάχυνσης και ιδιαίτερα της κατεύθυνσης και της γωνιακής ταχύτητας από τη διαδικασία της ιχνηλασίας.

Μοντέλο κίνησης	PANTAP		VANET		ΣΥΝΤΗΞΗ	
	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
CV	1.997	0.999	0.835	0.540	0.692	0.383
CA	2.066	1.012	0.764	0.456	0.602	0.301
CTR	1.847	0.850	0.822	0.529	0.682	0.372
CTRA	1.861	0.859	0.744	0.445	0.574	0.295
DS	1.777	0.794	0.658	0.387	0.523	0.253

Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση δίνονται σε μέτρα (m)

Πίνακας 10: Αποτελέσματα μελλοντικής τροχιάς με και χωρίς VANET (4 sec)

Τα αποτελέσματα είναι ενδεικτικά των πλεονεκτημάτων που προκύπτουν από τη χρήση των ασύρματων επικοινωνιών στον αλγόριθμο υπολογισμού της μελλοντικής τροχιάς. Αξιοποιώντας τις μετρήσεις που απορρέουν άμεσα από τους αισθητήρες των άλλων αυτοκινήτων βελτιώνεται σημαντικά η εκτίμηση της μελλοντικής τροχιάς.

Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο των δοκιμών ελέγχθηκε η αξιοπιστία της πρόβλεψης της τροχιάς με την πάροδο του χρόνου. Η τροχιά αυτή εξάχθηκε χρησιμοποιώντας διαφορετικά μοντέλα κίνησης για 1, 2, 4 και 6 δευτερόλεπτα πρόβλεψης. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα εμφανίζονται στον Πίνακα 11.

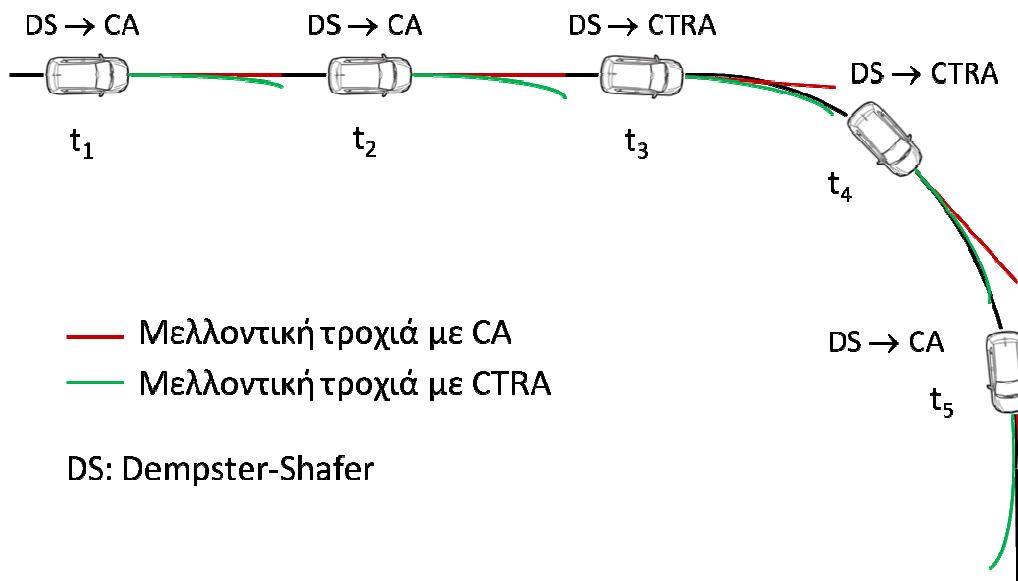
Η κίνηση ενός αυτοκινήτου στο δρόμο είναι μια ιδιαίτερα δυναμική διαδικασία, επομένως η πρόβλεψη της τροχιάς του δεν είναι αξιόπιστη μετά από λίγα δευτερόλεπτα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο υπολογισμός της μελλοντικής τροχιάς για περίπου 4 δευτερόλεπτα αρκεί για εφαρμογές οδικής ασφάλειας. Πέρα από αυτό το χρονικό παράθυρο των 4 δευτερολέπτων, το σφάλμα το οποίο εισάγεται δεν είναι αποδεκτό για κρίσιμες καταστάσεις που σχετίζονται με την ασφάλεια. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των 6 δευτερολέπτων το σφάλμα είναι σχεδόν διπλάσιο από ότι στην περίπτωση των 4 δευτερολέπτων.

Μοντέλο κίνησης	1 sec		2 sec		4 sec		6 sec	
	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
CV	0.05	0.09	0.23	0.22	0.66	0.53	1.23	0.98
CA	0.04	0.08	0.20	0.20	0.54	0.42	0.93	0.69
CTR	0.05	0.09	0.23	0.22	0.65	0.52	1.20	0.95
CTRA	0.04	0.08	0.19	0.19	0.52	0.41	0.89	0.66
DS	0.04	0.08	0.18	0.18	0.46	0.35	0.77	0.56

Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση δίνονται σε μέτρα (m)

Πίνακας 11: Αξιοπιστία της μελλοντικής τροχιάς στο χρόνο

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να αναλυθεί η συμπεριφορά του αλγορίθμου στις μεταβάσεις, δηλαδή όταν ένας κυρτός δρόμος ακολουθεί ένα ευθύγραμμο τμήμα και το αντίστροφο. Ένα παράδειγμα δίνεται στην Εικόνα 41, όπου μια ευθεία του οδικού δικτύου γίνεται καμπύλη στη συνέχεια. Η χρήση ενός μοντέλου CA θα είχε καλύτερα αποτελέσματα στην αρχή και όχι τόσο καλά στην στροφή. Από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιώντας ένα CTRA θα οδηγούσε σε καλύτερη απόδοση στον καμπύλο δρόμο. Σε κάθε περίπτωση η απόδοση του συστήματος συλλογιστικής DS, ακόμη και στις μεταβάσεις, όπου τα αποτελέσματα είναι ελαφρώς χειρότερα, είναι καλύτερη από τη χρήση οποιουδήποτε άλλου μοντέλου κίνησης. Η μελλοντική τροχιά υπολογίζεται κάθε 100ms για το υποκείμενο αυτοκίνητο, επομένως η προσαρμογή του μοντέλου κίνησης κατά τη διάρκεια της μετάβασης είναι αρκετά γρήγορη (αμέσως μόλις υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία). Για μεγαλύτερη ευκρίνεια και καλύτερη κατανόηση έχουν αφαιρεθεί κάποιες ενδιάμεσες τροχιές από την Εικόνα 41. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς τις χρονικές στιγμές t_1 , t_2 και t_5 το μοντέλο CA επιλέχθηκε από το σύστημα DS, ενώ τις στιγμές t_3 και t_4 το μοντέλο CTRA προτιμήθηκε.



Εικόνα 41: Συμπεριφορά του αλγορίθμου στις μεταβάσεις

4.5.1.2 Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος SAFESPOT

Ο έλεγχος της απόδοσης του αλγορίθμου υπολογισμού της μελλοντικής τροχιάς πραγματοποιήθηκε και στα πλαίσια του ερευνητικού ευρωπαϊκού προγράμματος SAFESPOT. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο εξοπλισμένα αυτοκίνητα, ένα κόκκινο και ένα μπλε, του ερευνητικού κέντρου της FIAT (CRF) και οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στην πίστα του κέντρου αυτού στο Ορμπασσάνο (περιοχή κοντά στο Τορίνο). Το υποκείμενο αυτοκίνητο (αυτοκίνητο Α) ήταν το κόκκινο, ενώ το αυτοκίνητο Β ήταν το μπλε. Τα αυτοκίνητα αυτά πραγματοποίησαν έναν ολόκληρο κύκλο στην πίστα και οι τροχιές τους υπολογίστηκαν και αποθηκεύτηκαν για να επεξεργαστούν στη συνέχεια στο εργαστήριο.

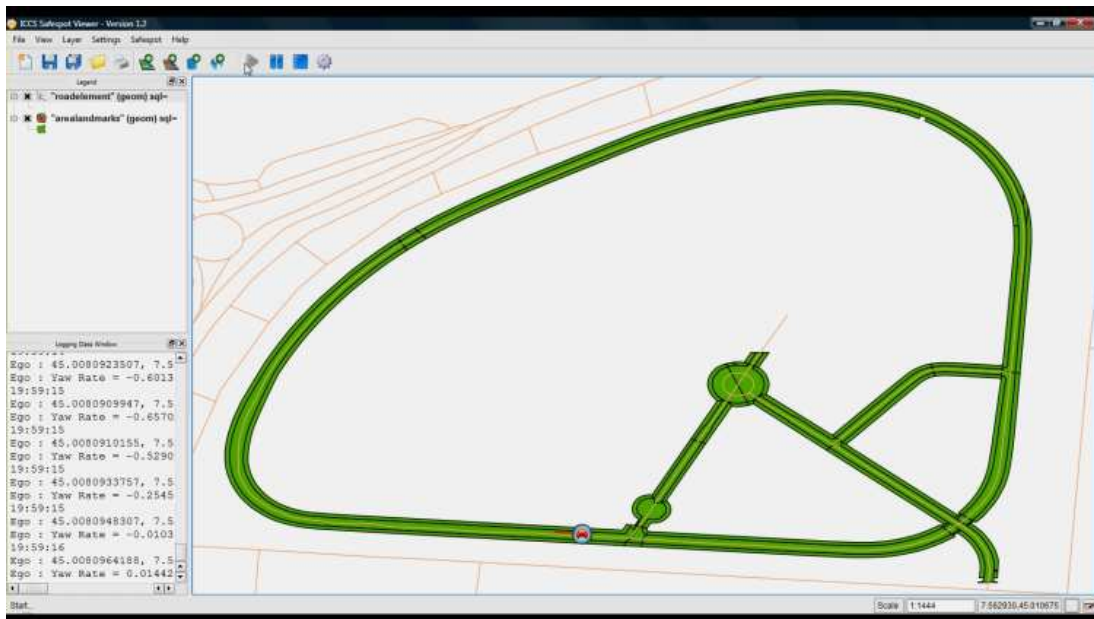
Ο έλεγχος ορθότητας του αλγορίθμου πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις. Πρώτα έγινε οπτικός έλεγχος ορθότητας της τροχιάς και στη συνέχεια έγινε ανάλυση των δεδομένων και εξαγωγή αποτελεσμάτων στο εργαστήριο.

Ο οπτικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός εργαλείου που αναπτύχθηκε από την ομάδα I-SENSE και στην ουσία έχει τη δυνατότητα να απεικονίζει δυναμικά και σε πραγματικό χρόνο δεδομένα από τη βάση δεδομένων των χαρτών καθώς και τα αποτελέσματα της σύντηξης (αυτοκίνητα, τροχιές κλπ.). Μια απεικόνιση του εργαλείου αυτού στην οποία φαίνεται η πίστα του Ορμπασσάνο, το υποκείμενο αυτοκίνητο και η μελλοντική τροχιά του δίνεται στην Εικόνα 42.

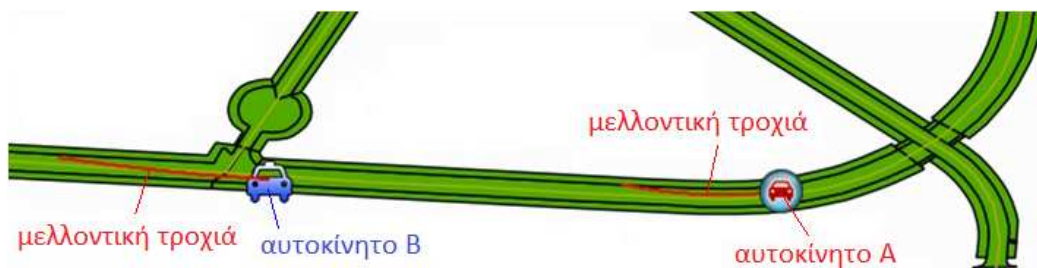
Ένας πρώτος οπτικός έλεγχος έδειξε την ορθότητα του αλγορίθμου πρόβλεψης της μελλοντικής τροχιάς και για τα δύο αυτοκίνητα. Ένα καρτέ που δείχνει τις τροχιές των αυτοκινήτων και κάποια γεωμετρικά στοιχεία του χάρτη φαίνεται στην Εικόνα 43.

Η απόκτηση αληθινών δεδομένων (ground truth) θέσης για τον έλεγχο του αλγορίθμου μελλοντικής τροχιάς είναι αρκετά δύσκολη διαδικασία καθώς τα αυτοκίνητα στο SAFESPOT δεν είναι εξοπλισμένα με αισθητήρα DGPS. Το πρόβλημα είναι ακόμα πιο πολύπλοκο για τον έλεγχο του αλγορίθμου στο

αυτοκίνητο B, καθώς για τον έλεγχο μόνο απομακρυσμένες, όχι ακριβείς και θορυβώδεις μετρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Για το λόγο αυτό ο έλεγχος του αλγορίθμου έγινε μόνο για το υποκείμενο αυτοκίνητο. Σαν αληθινά δεδομένα θέσης χρησιμοποιήθηκαν οι θέσεις που προέρχονται από την ενισχυμένη μονάδα προσδιορισμού θέσης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του έργου και λαμβάνει υπόψη για τον υπολογισμό της θέσης δεδομένα από κάμερα, χάρτες, GPS, αδρανειακούς αισθητήρες και άλλες ασύρματες τεχνολογίες και προσδιορίζει τη θέση με αρκετά μεγάλη ακρίβεια (σφάλμα θέσης μικρότερο από 0.5 m).



Εικόνα 42: Πίστα της CRF στο Ορμπασάνο



Εικόνα 43: Οπτικός έλεγχος ορθότητας της τροχιάς

Η διαδικασία αποτίμησης είναι ίδια με αυτή που περιγράφηκε στην Εικόνα 40 με τη μόνη διαφορά ότι αντί για DGPS σημεία χρησιμοποιήθηκαν τα σημεία από τη μονάδα προσδιορισμού θέσης του SAFESPOT. Άλλη μία διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων είναι ο κύκλος επεξεργασίας που ενώ προηγουμένως ήταν 100 ms, στο SAFESPOT ήταν κλειδωμένος στα 80 ms, οπότε και το χρονικό διάστημα μεταξύ των διαδοχικών σημείων της τροχιάς είναι 80 ms. Το πρώτο σημείο της τροχιάς είναι πάντα το ίδιο με αυτό της μονάδας προσδιορισμού θέσης, επομένως τα σύνολα δεδομένων προς σύγκριση ήταν τέλεια ευθυγραμμισμένα στο χρόνο.

Στον Πίνακα 12 παρατίθενται η μέση απόσταση των σημείων της μελλοντικής τροχιάς καθώς και η τυπική τους απόκλιση από τις πραγματικές θέσεις που παρέχονται από τη μονάδα προσδιορισμού της θέσης. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν έναν ολόκληρο γύρο (936 κύκλους επεξεργασίας) στην πίστα και είναι αρκετά ικανοποιητικά αν αναλογιστεί κανείς ότι κατά τη διάρκεια αυτού του γύρου πραγματοποιήθηκαν κάποιοι ελιγμοί, όπως αλλαγή λωρίδας, προσπέραση κλπ. Τα δεδομένα αφορούν την μελλοντική τροχιά για 2 δευτερόλεπτα μπροστά. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι στη διάρκεια των μετρήσεων εντοπίστηκε ένα σφάλμα στα δεδομένα του ψηφιακού χάρτη στην κάτω αριστερή στροφή της πίστας το οποίο διορθώθηκε μετά τις μετρήσεις.

Αριθμός κύκλων επεξεργασίας	Μέση τιμή (m)	Τυπική απόκλιση (m)
936	0.329588846	0.388680878

Πίνακας 12: Αποτελέσματα υπολογισμού μελλοντικής τροχιάς στο SAFESPOT (2 sec)

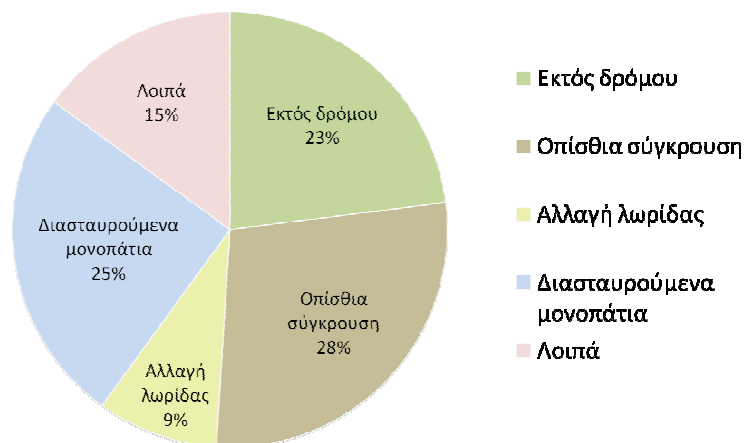
4.5.2 Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγορίθμου στην EEBL

Ο αλγόριθμος υπολογισμού της μελλοντικής τροχιάς μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μια πλειάδα εφαρμογών. Εδώ επιλέχθηκε η εφαρμογή φρεναρίσματος έκτακτης ανάγκης ή αλλιώς EEBL κυρίως λόγω της απλότητας της αλλά και της σημασίας της όπως θα αναλυθεί και παρακάτω. Το υποκειφάλαιο αυτό διακρίνεται σε δύο επιμέρους τμήματα. Στο πρώτο περιγράφεται γενικά η εφαρμογή EEBL, ενώ στο δεύτερο δίνονται κάποια αποτελέσματα.

4.5.2.1 Περιγραφή εφαρμογής EEBL

Η εφαρμογή EEBL έχει σχεδιαστεί για να ειδοποιεί τους οδηγούς όταν ένα αυτοκίνητο μπροστά τους φρενάρει απότομα. Η EEBL θεωρείται η πρώτη εφαρμογή ασφάλειας που χρησιμοποιεί καθαρή ασύρματη επικοινωνία μεταξύ αυτοκινήτων και είναι στην πραγματικότητα μια υπο-περίπτωση της εφαρμογής συνεργατικής προειδοποίησης σύγκρουσης (Cooperative Collision Warning – CCW). Τέτοιου είδους εφαρμογές απαιτούν αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ αυτοκινήτων με πολύ χαμηλό χρόνο απόκρισης.

Σε πραγματικές συνθήκες, τα πίσω φώτα ενός αυτοκινήτου ειδοποιούν τους οδηγούς που ακολουθούν, σε περίπτωση που το αυτοκίνητο αυτό φρενάρει. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες περιπτώσεις στις οποίες το σύστημα αυτό δεν είναι αρκετό. Για παράδειγμα, σε κακές καιρικές συνθήκες (π.χ. ομίχλη, χιόνι, βροχή), όπου η ορατότητα είναι περιορισμένη, οι οδηγοί πίσω από το αυτοκίνητο που φρενάρει δεν είναι σε θέση να δουν τα φώτα πέδησης μέχρι να έρθουν πολύ κοντά. Επιπλέον, η εφαρμογή αυτή είναι χρήσιμη όταν το οπτικό πεδίο του οδηγού εμποδίζεται από άλλα αυτοκίνητα. Ως εκ τούτου, η ανάγκη για εναλλακτικό τρόπο ειδοποίησης των οδηγών οδήγησε στην ανάπτυξη της παρούσας εφαρμογής.



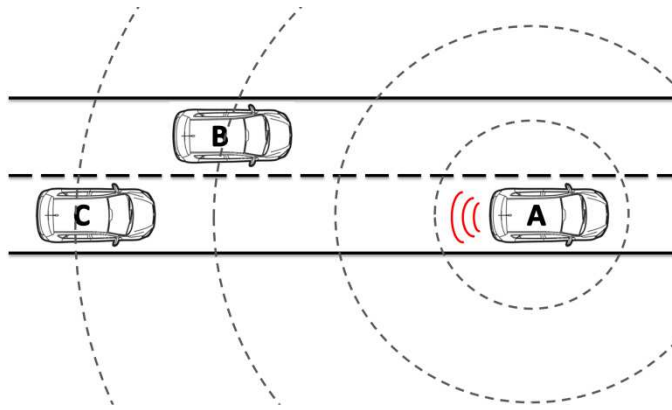
Εικόνα 44: Τα πιο συνηθισμένα ατυχήματα σύμφωνα με τον NHTSA [95]

Το μήνυμα που προέρχεται από την εφαρμογή αυτή και μεταδίδεται στα γύρω αυτοκίνητα μπορεί να επεκτείνει τον ορίζοντα των απειλούμενων οδηγών και να τους προειδοποιήσει όσο το δυνατόν νωρίτερα. Το αυτοκίνητο το οποίο φρενάρει απότομα γνωστοποιεί τη θέση του και άλλες δυναμικές ιδιότητές του (π.χ. ταχύτητα, γωνιακή ταχύτητα) μαζί με το μήνυμα που ειδοποιεί ότι φρενάρει απότομα, προκειμένου το μήνυμα αυτό να χρησιμοποιηθεί από τα αυτοκίνητα που ακολουθούν. Τα αυτοκίνητα αυτά θα πρέπει πρώτα να ελέγξουν αν το μήνυμα είναι χρήσιμο και στη συνέχεια να ειδοποιήσουν τον οδηγό. Σε περίπτωση που το μήνυμα δεν είναι σχετικό τότε ο οδηγός δεν θα πρέπει να ενοχλείται.

Ο στόχος της EEBL είναι η μείωση των ατυχημάτων που σχετίζονται με οπίσθιες συγκρούσεις. Σύμφωνα με τα στατιστικά του οργανισμού NHTSA [95] τα ατυχήματα αυτά αποτελούσαν το μεγαλύτερο μερίδιο των συγκρούσεων το 2007. Το γεγονός αυτό τονίζεται και στην Εικόνα 44.

Η εφαρμογή αυτή μπορεί όχι μόνο να ενισχύσει την εμβέλεια προειδοποίησης, ότι ένα αυτοκίνητο φρενάρει απότομα, αλλά και να παρέχει σημαντικές πληροφορίες όπως είναι ο ρυθμός επιτάχυνσης ή επιβράδυνσής του.

Έστω ότι το αυτοκίνητο Α στην Εικόνα 45 φρενάρει απότομα. Το σύστημα EEBL του Α θα στείλει ένα ενημερωτικό μήνυμα σε όλα τα αυτοκίνητα στην περιοχή (στην περίπτωσή μας στο Β και στο C) για να τα ειδοποιήσει. Το μήνυμα αυτό εκτός από το γεγονός της απότομης πέδησης θα περιλαμβάνει κάποιες επιπλέον πληροφορίες, όπως είναι η ταυτότητα του αυτοκινήτου, η θέση του, η ταχύτητά του, η γωνιακή του ταχύτητα, η επιβράδυνσή του και η κατεύθυνσή του. Με τον τρόπο αυτό τα γειτονικά αυτοκίνητα που λαμβάνουν όλες αυτές τις πληροφορίες μπορούν να πραγματοποιήσουν τους κατάλληλους υπολογισμούς για τη συσχέτιση των δεδομένων και την εξαγωγή της μελλοντικής τροχιάς και τελικά να αποφασίσουν αν θα αναλάβουν δράση ή όχι. Στο ανωτέρω παράδειγμα, ο οδηγός του αυτοκινήτου Β δεν θα πρέπει να προβεί σε οποιαδήποτε ενέργεια, ενώ ο αντίστοιχος του C θα πρέπει να ειδοποιηθεί εγκαίρως.



Εικόνα 45: Παράδειγμα σεναρίου της εφαρμογής EEBL

Ο λόγος που επιλέχθηκε η EEBL εφαρμογή για τον έλεγχο του αλγορίθμου πρόβλεψης της μελλοντικής τροχιάς είναι διττός. Πρώτα απ' όλα, είναι μια σχετικά απλή εφαρμογή η οποία μπορεί να αποδείξει την επίδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου σε πραγματικό χρόνο. Δεύτερον, μπορούν να εξαχθούν σχετικά εύκολα ορισμένες ποιοτικές πληροφορίες που αφορούν τη συμπεριφορά του αλγορίθμου και την ορθή ειδοποίηση του οδηγού σε μια επικείμενη επικίνδυνη κατάσταση. Οι λεπτομέρειες σχετικά με την ακρίβεια και την απόδοση του αλγορίθμου υπολογισμού της μελλοντικής τροχιάς δεν αποτελούν μέρος των δοκιμών αυτών, αλλά μέρος της πρώτης σειράς δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν και παρουσιάστηκαν προηγουμένως.

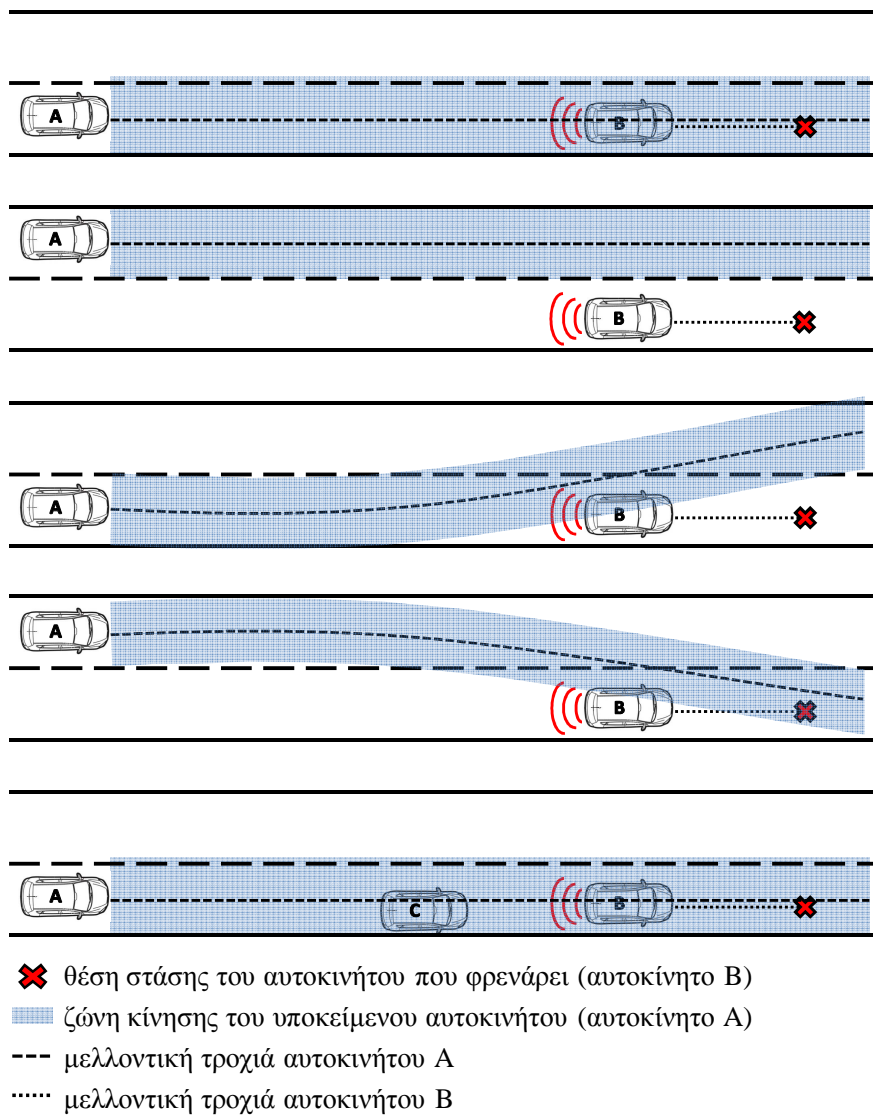
4.5.2.2 Αποτελέσματα της EEBL

Αυτή η σειρά δοκιμών σχετίζεται με την προσαρμογή και την αξιολόγηση του αλγορίθμου υπολογισμού της μελλοντικής τροχιάς, που παρουσιάστηκε προηγουμένως, στην EEBL εφαρμογή. Μια σειρά από ποικίλα σενάρια πραγματοποιήθηκε σε ένα ευθύγραμμο τμήμα ενός δρόμου με δύο λωρίδες κυκλοφορίας. Μια λεπτομερής περιγραφή αυτών των σεναρίων παρουσιάζεται στην Εικόνα 46. Οι δοκιμές αυτές αποσκοπούν στο να επιδείξουν την επίδοση της συνεργατικής συσχέτισης δεδομένων, του αλγορίθμου υπολογισμού της μελλοντικής τροχιάς και της ορθής ειδοποίησης που παρέχεται στον οδηγό, στα πλαίσια της EEBL εφαρμογής.

Πρώτα απ' όλα, όταν ένα αυτοκίνητο φρενάρει απότομα (αυτοκίνητο B στην Εικόνα 46) ένα μήνυμα γεγονός εκπέμπεται στο VANET ενημερώνοντας τα αυτοκίνητα που ακολουθούν γι' αυτό το γεγονός. Το μήνυμα αυτό, μαζί με την αναφορά για το απότομο φρενάρισμα, περιλαμβάνει και τα πιο ενημερωμένα δυναμικά χαρακτηριστικά του αυτοκινήτου B που φρενάρει. Με το που λάβει αυτό το μήνυμα το υποκείμενο αυτοκίνητο (αυτοκίνητο A στην Εικόνα 46) ξεκινάει την εφαρμογή των αλγορίθμων συσχέτισης και σύντηξης δεδομένων. Δηλαδή, σε περίπτωση που το αυτοκίνητο B έχει ανιχνευτεί και από το ραντάρ, τότε η σύντηξη δεδομένων λαμβάνει χώρα. Σε διαφορετική περίπτωση εκτελείται μόνο χωρική και χρονική ευθυγράμμιση του μηνύματος από το VANET. Στη συνέχεια, οι πληροφορίες αυτές μαζί με τις

φιλτραρισμένες μετρήσεις του αυτοκινήτου A διαβιβάζονται στη μονάδα υπολογισμού της μελλοντικής τροχιάς όπου εκτιμώνται οι μελλοντικές τροχιές τόσο του αυτοκινήτου A όσο και του B.

Έχοντας υπολογίσει τη μελλοντική τροχιά του αυτοκινήτου B, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η θέση στην οποία το αυτοκίνητο αυτό αναμένεται να σταματήσει. Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία μιας ζώνης γύρω από τη μελλοντική τροχιά του αυτοκινήτου A, το πλάτος της οποίας τόσο στη δεξιά όσο και στην αριστερή πλευρά της τροχιάς ορίζεται στο 1.75 m. Αυτή η επιλογή βασίζεται στην τυπική τιμή του πλάτους των λωρίδων κυκλοφορίας που είναι περίπου 3.5 m. Στη συνέχεια, ένας αλγόριθμος που τρέχει στο αυτοκίνητο A ελέγχει αν η θέση που θα σταματήσει το αυτοκίνητο B και η ζώνη που δημιουργείται γύρω από τη μελλοντική τροχιά του A τέμνονται. Στην περίπτωση που υπάρχει τομή τότε ο οδηγός ενημερώνεται γι' αυτό το γεγονός. Σε διαφορετική περίπτωση, ο οδηγός δεν θα πρέπει να ενημερωθεί ώστε να μην αποσπαστεί η προσοχή του από την οδήγηση.



Εικόνα 46: Σενάρια δοκιμών για την εφαρμογή EEBL

Το τελευταίο σενάριο που εμφανίζεται στην Εικόνα 46, περιλαμβάνει ένα επιπλέον αυτοκίνητο C (συμβατικό I.X. αυτοκίνητο) το οποίο κρύβει το αυτοκίνητο B από το ραντάρ του A. Αυτό το σενάριο αποτελεί μια πρόκληση και είναι ενδεικτικό για την επίδοση της συνεργατικής συσχέτισης, ιδίως όταν τα αυτοκίνητα B και C κινούνται πολύ κοντά.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, οι μελλοντικές τροχιές όλων των εμπλεκόμενων αυτοκινήτων υπολογίστηκαν στο αυτοκίνητο A και αποθηκεύτηκαν σε ένα αρχείο καταγραφής (log file). Επιπλέον, συγκεντρώθηκαν πραγματικά δεδομένα από όλα τα αυτοκίνητα, κυρίως δεδομένα θέσης. Στο εργαστήριο όλες αυτές οι πληροφορίες αναλύθηκαν και ελέγχθηκε αν η ειδοποίηση στον οδηγό ήταν ορθή ή λανθασμένη. Οι πιθανές αιτίες για τη λανθασμένη ειδοποίηση του οδηγού μπορεί να είναι οι ακόλουθες: εσφαλμένη χωρική ή/και χρονική ευθυγράμμιση, αποτυχία στη συσχέτιση δεδομένων, κακή εκτίμηση της μελλοντικής τροχιάς.

Κάθε ένα από τα σενάρια που εμφανίζονται στην Εικόνα 46 πραγματοποιήθηκε αρκετές φορές και τα αποτελέσματα της ορθής ή εσφαλμένης προειδοποίησης του οδηγού φαίνονται στον Πίνακα 13. Το μοντέλο κίνησης που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτό που προέκυπτε κάθε φορά από το σύστημα συλλογιστικής DS. Τα αποτελέσματα έδειξαν συνολικά μια καλή επίδοση από την προσαρμογή του αλγορίθμου υπολογισμού της μελλοντικής τροχιάς στην εφαρμογή EEBL. Ο οδηγός δεν είχε ενημερωθεί (λανθασμένα) για το απότομο φρενάρισμα του αυτοκινήτου B σε μία από τα επαναλήψεις του σεναρίου το οποίο περιλάμβανε και το αυτοκίνητο C (το τελευταίο σενάριο στην Εικόνα 46), λόγω λανθασμένης συσχέτισης του μηνύματος από το VANET με τα ίχνη του ραντάρ.

Η EEBL είναι μία από τις εφαρμογές οδικής ασφαλείας, στην οποία ο συνεργατικός αλγόριθμος υπολογισμού της μελλοντικής τροχιάς είναι πολύ χρήσιμος στην πράξη. Το υποκείμενο αυτοκίνητο εκμεταλλεύόμενο τα μηνύματα από το VANET μπορεί να εντοπίσει αρκετά νωρίς αν κάποιο προπορευόμενο αυτοκίνητο φρενάρει απότομα. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη την έξοδο της μονάδας υπολογισμού της μελλοντικής τροχιάς μπορεί να υπολογιστεί τόσο η θέση που το αυτοκίνητο που φρενάρει πρόκειται να ακινητοποιηθεί όσο και η πιθανότητα η πορεία του υποκείμενου αυτοκινήτου να τέμνεται με αυτή τη θέση.

Αριθμός σεναρίων	Ορθή ειδοποίηση	Λάθος ειδοποίηση
15	14	1
Συνολικά	93.3%	6.7%

Πίνακας 13: Αποτελέσματα ειδοποίησης οδηγού

Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε μια νέα μέθοδος για τον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς του υποκείμενου αυτοκινήτου και των υπόλοιπων αυτοκινήτων. Η μέθοδος αυτή λαμβάνει υπόψη και τα στοιχεία που προέρχονται από τα άλλα αυτοκίνητα μέσω της ασύρματης επικοινωνίας.

Στην εργασία αυτή τονίζεται η σημασία της χρήσης των μηνυμάτων του VANET για την παροχή βοήθειας σε ένα αυτοκίνητο ώστε να αντιλαμβάνεται καλύτερα το οδικό περιβάλλον. Πρώτα απ' όλα, η ανάγκη για το έργο αυτό προέρχεται από το γεγονός ότι η εκτίμηση της δυναμικής κατάστασης των άλλων αυτοκινήτων που στηρίζεται μόνο σε αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι στο υποκείμενο αυτοκίνητο και σε προηγμένες τεχνικές φιλτραρίσματος και ιχνηλασίας δεν είναι ακριβή. Η εκτίμηση των τιμών της ταχύτητας, της γωνιακής ταχύτητας, της επιτάχυνσης και της κατεύθυνσης από απομακρυσμένες και θορυβώδεις μετρήσεις εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των διαθέσιμων αισθητήρων και αποτελεί ένα σχετικά δύσκολο έργο. Ωστόσο, κατά τη διαβίβαση αυτών των τιμών μέσω ασύρματων μηνυμάτων, παρουσιάζεται σημαντική βελτίωση και η εκτίμηση της μελλοντικής τροχιάς είναι πολύ καλύτερη από ότι χωρίς τη χρήση VANET. Ουσιαστική προς αυτή την κατεύθυνση είναι επίσης η χρήση των ψηφιακών χαρτών και του αισθητήρα GPS. Χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες, ειδικά την καμπυλότητα του δρόμου στη θέση που κινείται το αυτοκίνητο, μπορούν να επιτευχθούν ακόμα καλύτερα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, αν το αυτοκίνητο κινείται σε καμπύλο δρόμο τότε ένα καμπυλόγραμμο μοντέλο κίνησης, όπως το CTR ή το CTRA, θα επιλεγεί για τον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς.

Τα αποτελέσματα που αφορούν την μελλοντική τροχιά του υποκείμενου αυτοκινήτου έδειξαν ότι η απόδοση του αλγορίθμου, όταν χρησιμοποιήθηκε η έξοδος του συστήματος συλλογιστικής Dempster-Shafer, ήταν καλύτερη από την απόδοση του καθενός από τα τέσσερα αυτόνομα μοντέλα κίνησης που χρησιμοποιήθηκαν. Η ακρίβεια που επιτεύχθηκε, στην περίπτωση της μελλοντικής τροχιάς των 4 δευτερολέπτων, ήταν μικρότερη από 50 cm και η τυπική απόκλιση ήταν επίσης αρκετά μικρή. Επομένως, ο αλγόριθμος αυτός είναι κατάλληλος για κρίσιμες καταστάσεις που αφορούν την οδική ασφάλεια όπου η γνώση της ακριβούς θέσης του αυτοκινήτου είναι απαραίτητη σε ένα διακριτό χρονικό οριζόντιο. Το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η εκτίμηση της μελλοντικής τροχιάς είναι αξιόπιστη είναι περίπου 3 με 4 δευτερόλεπτα. Η κίνηση ενός αυτοκινήτου στο δρόμο είναι εξαιρετικά δυναμική διαδικασία, ειδικά αν εκτελεί ελιγμούς, οπότε η εκτίμηση της τροχιάς δεν είναι αξιόπιστη μετά από λίγα δευτερόλεπτα.

Η εκμετάλλευση του ασύρματου δικτύου πρόσθεσε ένα επιπλέον όφελος στον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς των άλλων αυτοκινήτων, καθώς σε προηγούμενες προσεγγίσεις χρειαζόταν ιδιαίτερη προσοχή λόγω των φυσικών περιορισμών και των χαρακτηριστικών του εκάστοτε αισθητήρα, π.χ. κακή εκτίμηση των πλευρικών ιδιοτήτων των αντικειμένων από το ραντάρ. Τα αποτελέσματα από την προσαρμογή και τη δοκιμή του προτεινόμενου αλγορίθμου στην εφαρμογή EEBL επαλήθευσαν εκ νέου το όφελος από την εκμετάλλευση της μελλοντικής τροχιάς στις εφαρμογές ασφάλειας των αυτοκινήτων.

Συμπερασματικά, τα συνολικά αποτελέσματα έδειξαν την πολύ καλή επίδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου, γεγονός που τονίζει τη σημασία της χρήσης ασύρματων μηνυμάτων στο οδικό περιβάλλον. Ο συνεργατικός αλγόριθμος υπολογισμού της μελλοντικής τροχιάς που παρουσιάστηκε σε αυτό το κεφάλαιο θα δώσει τη δυνατότητα για την πραγματοποίηση και άλλων προηγμένων εφαρμογών ασφάλειας, όπως είναι η συνεργατική προειδοποίηση σύγκρουσης και ο συνεργατικός προσαρμοστικός έλεγχος πλοήγησης.

ΣΥΝΤΗΞΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ BAYES

Στη σύντηξη δεδομένων υψηλού επιπέδου χρησιμοποιούνται κυρίως τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις ανάλογα και με το είδος του προβλήματος προς επίλυση: τα ασαφή συστήματα (fuzzy systems), η θεωρία Dempster-Shafer και τα πιθανοτικά δίκτυα (probabilistic networks) ή απλώς δίκτυα Bayes (Bayesian networks). Η θεωρία των ασαφών συστημάτων περιγράφηκε συνοπτικά στο Κεφάλαιο 3 όπου και χρησιμοποιήθηκε ένα ασαφές σύστημα για το φιλτράρισμα των δεδομένων του αυτοκινήτου. Επίσης, στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκε περιληπτικά η θεωρία Dempster-Shafer και περιγράφηκε ένα σύστημα συλλογιστικής βασισμένο στη θεωρία αυτή για τον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς των αυτοκινήτων.

Το παρόν κεφάλαιο ασχολείται με την τρίτη προσέγγιση, δηλαδή τα δίκτυα Bayes. Στόχος του είναι να γίνει αρχικά μια σύντομη εισαγωγή στα δίκτυα αυτά και στη θεωρία τους που είναι απαραίτητα ώστε να κατανοήσει ο αναγνώστης το υπόλοιπο κεφάλαιο. Στη συνέχεια περιγράφονται τα δύο συστήματα σύντηξης δεδομένων υψηλού επιπέδου που αναπτύχθηκαν με τη βοήθεια της θεωρίας αυτής: η μονάδα εκτίμησης της πυκνότητας της κυκλοφορίας και η μονάδα ανίχνευσης ομίχλης. Τέλος, δίνονται κάποια αποτελέσματα από την εφαρμογή αυτών των συστημάτων σε δίκτυα αυτοκινήτων.

5.1 Εισαγωγή

Τα Bayesian ή πιθανοτικά δίκτυα χρησιμοποιούνται εκτενώς τα τελευταία χρόνια ως πολύ ισχυρά εργαλεία μοντελοποίησης στη συλλογιστική (reasoning) και λήψη απόφασης υπό αβεβαιότητα [96]. Σε αυτή την εισαγωγική παράγραφο γίνεται μια σύντομη περιγραφή των κυριότερων παραδειγμάτων έμπειρων συστημάτων (expert systems) [97], τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως για λήψη απόφασης υπό αβεβαιότητα, και αναδεικνύεται η ισχύς των δικτύων Bayes σε σχέση με τις άλλες προσεγγίσεις.

❖ *Συστήματα βασισμένα σε κανόνες (Rule-based Systems)*

Τα συστήματα που βασίζονται σε κανόνες αποτελούν την απλούστερη και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μορφή έμπειρων συστημάτων. Ένας κανόνας είναι μια έκφραση της μορφής:

$$\text{αν } A \text{ τότε } B \tag{5.1}$$

όπου A είναι ένας ισχυρισμός και B μπορεί να είναι μια πράξη ή επίσης ένας ισχυρισμός. Για παράδειγμα, οι ακόλουθοι τρεις κανόνες θα μπορούσαν να είναι μέρος ενός ευρύτερου συνόλου κανόνων για επίλυση προβλημάτων που αφορούν αντλίες ύδρευσης:

Αν η αντλία αποτύχει **τότε** η πίεση είναι χαμηλή (5.2)

Αν η αντλία αποτύχει **τότε** έλεγξε την στάθμη του λαδιού (5.3)

Αν υπάρχει αποτυχία ισχύος **τότε** υπάρχει και αποτυχία αντλίας (5.4)

Ένα σύστημα βασισμένο σε κανόνες αποτελείται από μία βιβλιοθήκη τέτοιων κανόνων. Αυτοί οι κανόνες αντανακλούν τις βασικές σχέσεις σε έναν τομέα ή καλύτερα τρόπους επιχειρηματολογίας για τον τομέα αυτό.

Όταν συγκεκριμένες πληροφορίες για τον τομέα γίνονται διαθέσιμες, οι κανόνες χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή συμπερασμάτων και για να υποδείξουν τις απαραίτητες δράσεις. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται *εξαγωγή συμπεράσματος* (inference). Η εξαγωγή συμπεράσματος λαμβάνει χώρα σαν ένα είδος αλυσιδωτής αντίδρασης. Στο παραπάνω παράδειγμα αν υπάρχει μια ένδειξη για αποτυχία ισχύος, ο κανόνας (5.4) εκφράζει ότι υπάρχει αποτυχία στην αντλία και ο κανόνας (5.2) θα δηλώσει ότι η πίεση είναι χαμηλή. Επίσης ο κανόνας (5.3) θα μας δώσει την (μη ωφέλιμη) υπόδειξη να ελέγξουμε το επίπεδο του λαδιού.

Οι κανόνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και προς την αντίθετη κατεύθυνση. Υποθέτουμε ότι μας είπαν ότι η πίεση είναι χαμηλή· τότε ο κανόνας (5.2) δηλώνει ότι μπορεί να είναι λόγω αποτυχίας της αντλίας, ενώ ο κανόνας (5.4) δηλώνει ότι μία αποτυχία στην αντλία μπορεί να προκληθεί από αποτυχία ισχύος. Είναι επίσης δυνατή η χρησιμοποίηση του κανόνα (5.3) για υπόδειξη ελέγχου της στάθμης του λαδιού, αλλά είναι πολύ δύσκολο να ελέγξουμε ένα τέτοιο μίγμα από εξαγωγές συμπερασμάτων μπρος πίσω την ίδια στιγμή.

Αβεβαιότητα

Συχνά οι κανόνες δεν είναι απόλυτα βέβαιοι, και συχνά η συγκεντρωμένη πληροφορία υπόκειται σε αβεβαιότητα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ένα μέτρο βεβαιότητας προστίθεται τόσο στις προϋποθέσεις (premises) καθώς και στα συμπεράσματα (conclusions) των κανόνων του συστήματος. Επομένως, κάθε κανόνας δίνει μια συνάρτηση που περιγράφει πόσο μια αλλαγή στη βεβαιότητα της προϋπόθεσης αλλάζει τη βεβαιότητα του συμπεράσματος. Στην απλούστερη μορφή του ο κανόνας μοιάζει με:

Αν A (με βεβαιότητα x) **τότε** B (με βεβαιότητα f(x)) (5.5)

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι χειρισμού της αβεβαιότητας στα συστήματα που βασίζονται στους κανόνες. Οι πιο γνωστοί είναι η ασαφής λογική (fuzzy logic), οι παράγοντες βεβαιότητας (certainty factors) και προσαρμογές των συναρτήσεων εμπιστοσύνης (belief functions) των Dempster-Shafer. Το κοινό σε όλες αυτές τις μεθόδους είναι ότι ο χειρισμός της αβεβαιότητας γίνεται τοπικά. Δηλαδή, ο χειρισμός αυτός είναι απευθείας συνδεδεμένος με τους εισερχόμενους κανόνες και την αβεβαιότητα των στοιχείων τους. Έστω, για παράδειγμα ότι πρόσθετα στον κανόνα (5.5) έχουμε και τον ακόλουθο κανόνα

$$\text{Αν } \Gamma \text{ (με βεβαιότητα } x) \text{ τότε } B \text{ (με βεβαιότητα } g(x)) \quad (5.6)$$

Αν τώρα έχουμε την πληροφορία ότι ισχύει το Α με βεβαιότητα α και το Γ με βεβαιότητα γ , τότε ποια είναι η βεβαιότητα του Β;

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι για τον συνδυασμό των αβεβαιοτήτων, ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται. Το κοινό αυτών των τρόπων είναι ότι στις περισσότερες των περιπτώσεων οδηγούν σε εσφαλμένα συμπεράσματα. Αυτό συμβαίνει διότι ο συνδυασμός των αβεβαιοτήτων δεν είναι τοπικό φαινόμενο, αλλά εξαρτάται από ολόκληρη την διαδραματιζόμενη κατάσταση.

❖ *Νευρωνικά δίκτυα (Neural Networks)*

Ένα νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από πολλά στρώματα κόμβων: στην κορυφή υπάρχει ένα στρώμα *κόμβων εισόδου*, στο κάτω μέρος ένα στρώμα *κόμβων εξόδου* και στο ενδιάμεσο αυτών συνήθως ένα ή δύο στρώματα *κρυμμένων κόμβων*. Αν εξαιρέσουμε τους κόμβους εξόδου, όλοι οι κόμβοι σε ένα στρώμα είναι καταρχήν συνδεδεμένοι με όλους τους κόμβους του αμέσως κατώτερου στρώματος. Ένας κόμβος μαζί με τις εισερχόμενες συνδέσεις του αποκαλείται *perceptron*.

Ένα νευρωνικό εκτελεί *αναγνώριση προτύπων*. Για παράδειγμα, έχουν υλοποιηθεί νευρωνικά δίκτυα που διαβάζουν χειρόγραφους χαρακτήρες. Με αυτοματοποιημένο τρόπο, ένας χειρόγραφος χαρακτήρας μπορεί να μετατραπεί σε ένα σύνολο ευρημάτων (*findings*) σε καμπύλες (δεν είναι δουλειά του δικτύου). Το δίκτυο θα έχει έναν κόμβο εισόδου για κάθε πιθανό είδος ευρήματος και έναν κόμβο εξόδου για κάθε γράμμα του αλφαβήτου. Όταν ένα σύνολο ευρημάτων τροφοδοτείται στο δίκτυο, το σύστημα προσπαθεί να ταυριάζει το πρότυπο των ευρημάτων με τα ισοδύναμα πρότυπα των διαφορετικών χαρακτήρων.

Από τεχνικής πλευράς, οι κόμβοι εισόδου παίρνουν μια τιμή (0 ή 1). Αυτή η τιμή μεταδίδεται στους κόμβους του επόμενου επιπέδου. Κάθε ένας από αυτούς τους κόμβους εκτελεί το άθροισμα με βάρη των εισερχόμενων τιμών και αν το άθροισμα είναι μεγαλύτερο από ένα συγκεκριμένο κατώφλι, ο κόμβος τίθεται στη μονάδα και μεταδίδει αυτή την πληροφορία προς τα κάτω. Οι τιμές των κόμβων εξόδου καθορίζουν το γράμμα.

Επομένως, εκτός από την αρχιτεκτονική του δικτύου (τον αριθμό των στρωμάτων και τον αριθμό των κόμβων σε κάθε στρώμα), τα βάρη και τα κατώφλια καθορίζουν τη συμπεριφορά του δικτύου. Τα βάρη και τα κατώφλια τίθεται με σκοπό το δίκτυο να δρα όσο το δυνατόν καλύτερα. Αυτό επιτυγχάνεται με την *εκπαίδευση*: υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός παραδειγμάτων όπου τόσο οι τιμές εισόδου όσο και αυτές της εξόδου είναι γνωστές και οι οποίες τροφοδοτούνται στον αλγόριθμο εκπαίδευσης του δικτύου. Ο αλγόριθμος αυτός καθορίζει τα βάρη και τα κατώφλια με τέτοιο τρόπο ώστε η απόσταση μεταξύ του συνόλου των εξόδων του δικτύου και των επιθυμητών εξόδων από τα παραδείγματα γίνεται όσο το δυνατόν μικρότερη.

Δεν υπάρχει κάτι που να αποτρέπει τη χρήση των νευρωνικών δικτύων για τομείς που απαιτούν χειρισμό αβεβαιότητας. Αν οι σχέσεις είναι αβέβαιες (για παράδειγμα στην ιατρική διάγνωση), ένα νευρωνικό δίκτυο με την κατάλληλη εκπαίδευση θα είναι ικανό να δώσει την πιο πιθανή διάγνωση δεδομένου ενός συνόλου συμπτωμάτων. Ωστόσο, δεν θα είναι δυνατή η εξαγωγή της αβεβαιότητας του

συμπεράσματος από το δίκτυο, δεν θα είναι δυνατή η εξαγωγή της επόμενης πιθανής διάγνωσης και το πιο σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι δεν θα είναι γνωστό υπό ποιες προϋποθέσεις σχετικά με τον τομέα η προτεινόμενη διάγνωση είναι η πιο πιθανή.

❖ Δίκτυα Bayes ή πιθανοτικά (Bayesian Networks)

Τα δίκτυα Bayes συχνά αποκαλούνται και αιτιατά πιθανοτικά δίκτυα ή δίκτυα εμπιστοσύνης (belief networks). Ένα δίκτυο Bayes αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων και ένα σύνολο κατευθυντικών ακμών ανάμεσα στους κόμβους. Οι ακμές αντανακλούν τις σχέσεις αιτίας-αποτελέσματος στον τομέα. Τα αποτελέσματα αυτά συνήθως δεν είναι ντετερμινιστικά (π.χ. ασθένεια → σύμπτωμα). Η δύναμη ενός αποτελέσματος μοντελοποιείται σαν πιθανότητα:

$$\text{Αν αμυγδαλίτιδα τότε } P(\text{θερμοκρασία} > 37.9) = 0.75 \quad (5.7)$$

$$\text{Αν κοιλίτης τότε } P(\text{θερμοκρασία} > 37.9) = 0.65 \quad (5.8)$$

Επειδή κάποιος μπορεί να θεωρήσει τις παραπάνω προτάσεις ως κανόνες, ενώ δεν θα έπρεπε, χρησιμοποιείται ένας διαφορετικός συμβολισμός:

$$P(\text{θερμοκρασία} > 37.9 \mid \text{κοιλίτης}) = 0.65 \quad (5.9)$$

Επίσης υπάρχει ανάγκη να καθοριστεί ο τρόπος με τον οποίο συνδυάζονται οι δύο αυτές αιτίες. Δηλαδή, πρέπει να υπολογιστεί η πιθανότητα να έχει κάποιος πυρετό αν και τα δύο συμπτώματα είναι παρόντα και αν ο ασθενής είναι πλήρως υγιής. Αυτό που χρειάζεται είναι ο πλήρης καθορισμός των υπό συνθήκη πιθανοτήτων:

$$P(\text{θερμοκρασία} > 37.9 \mid \text{κοιλίτης, αμυγδαλίτιδα}) \quad (5.10)$$

όπου ο “κοιλίτης” και η “αμυγδαλίτιδα” μπορούν να βρίσκονται στις καταστάσεις “ναι” και “όχι”. Συνεπώς, για κάθε κόμβο πρέπει να καθοριστούν αριθμητικά όλοι οι συνδυασμοί των καταστάσεων για τις πιθανές αιτίες.

Στην ουσία τα δίκτυα Bayes χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση των πιθανοτήτων οποτεδήποτε η πληροφορία γίνεται διαθέσιμη. Το μαθηματικό υπόβαθρο γι’ αυτό τον υπολογισμό είναι το θεώρημα του Bayes:

$$P(A \mid B) P(B) = P(B \mid A) P(A) \quad (5.11)$$

Σε αντίθεση με τις μεθόδους των συστημάτων που βασίζονται στους κανόνες, η μέθοδος ενημέρωσης ενός δικτύου Bayes χρησιμοποιεί μια γενική προοπτική, και αν το μοντέλο και οι πληροφορίες είναι σωστές, μπορεί να αποδειχτεί ότι η μέθοδος υπολογίζει τις ενημερωμένες πιθανότητες σωστά (“σωστά” με την έννοια ότι λαμβάνονται υπόψη τα αξιώματα της κλασικής θεωρίας των πιθανοτήτων).

Κάθε κόμβος στο δίκτυο μπορεί να λάβει πληροφορία καθώς η μέθοδος δεν διακρίνει ανάμεσα σε εξαγωγή συμπεράσματος προς ή αντίθετα στην κατεύθυνση των ακμών. Επίσης, ταυτόχρονη είσοδος πληροφορίας σε αρκετούς κόμβους δεν θα επηρεάσει τον αλγόριθμο ενημέρωσης.

Μια ουσιαστική διαφορά ανάμεσα στα συστήματα που βασίζονται σε κανόνες και σε αυτά που βασίζονται στα δίκτυα Bayes είναι ότι στα πρώτα γίνεται προσπάθεια να μοντελοποιηθεί ο τρόπος με τον οποίο κάποιος ειδικός σκέφτεται (από εδώ προέρχεται και το όνομα έμπειρα συστήματα), ενώ στα δίκτυα Bayes γίνεται προσπάθεια να μοντελοποιηθούν οι εξαρτήσεις στον ίδιο τον τομέα ενδιαφέροντος. Συστήματα τέτοιου τύπου συχνά αποκαλούνται συστήματα υποστηρίξης απόφασης (decision support systems) ή κανονιστικά έμπειρα συστήματα (normative expert systems).

❖ Σύγκριση νευρωνικών δικτύων με τα δίκτυα Bayes

Η ουσιαστική διαφορά ανάμεσα στους δύο τύπους δικτύων είναι ότι σε ένα νευρωνικό δίκτυο perceptron στα κρυμμένα του στρώματα δεν υπάρχει καμία ερμηνεία για τον τομέα του συστήματος, ενώ αντίθετα όλοι οι κόμβοι του δικτύου Bayes παριστάνουν ιδέες που είναι καλώς ορισμένες σε σχέση με τον τομέα.

Αυτό σημαίνει πως η κατασκευή ενός δικτύου Bayes απαιτεί πλήρη γνώση του υπό εξέταση τομέα. Αν τέτοια γνώση μπορεί να αποκτηθεί μόνο μέσω μιας σειράς παραδειγμάτων τότε τα νευρωνικά δίκτυα φαίνεται να είναι ο ευκολότερος τρόπος. Αυτό μπορεί να είναι η πραγματικότητα για περιπτώσεις όπως η αναγνώριση των χειρόγραφων χαρακτήρων, η αναγνώριση προσώπων και άλλες εφαρμογές όπου το υπό ανάπτυξη σύστημα μοιάζει με την ικανότητα κάποιου επιδέξιου χειροτέχνη που βασίζεται μόνο στην εμπειρία.

Συχνά ασκείται κριτική στο γεγονός ότι για να κατασκευαστεί ένα δίκτυο Bayes χρειάζεται η γνώση πάρα πολλών πιθανοτήτων. Ωστόσο, δεν υπάρχει σημαντική διαφορά ανάμεσα σε αυτό τον αριθμό και στον αριθμό των βαρών και των κατωφλίων που πρέπει να είναι γνωστά με σκοπό την κατασκευή του νευρωνικού δικτύου, και μπορεί να μαθευτούν μόνο μέσω εκπαίδευσης. Είναι μία τεράστια αδυναμία των νευρωνικών δικτύων το γεγονός ότι δεν μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει τη γνώση που ίσως έχει εκ των προτέρων.

Οι πιθανότητες, από την άλλη πλευρά, μπορούν να αποτιμηθούν χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό από θεωρητική γνώση, εμπειρικές μελέτες ανεξάρτητες από το κατασκευασμένο σύστημα, εκπαίδευση και άλλες ποικίλες υποκειμενικές εκτιμήσεις.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι στην κατασκευή ενός νευρωνικού δικτύου η πορεία της εξαγωγής συμπεράσματος είναι καθορισμένη. Είναι αποφασισμένο εκ των προτέρων για ποιες σχέσεις συλλέγονται πληροφορίες και ποιες σχέσεις το σύστημα πρέπει να υπολογίσει. Τα δίκτυα Bayes είναι πολύ πιο ευέλικτα από αυτή την άποψη.

5.2 Δίκτυα Bayes

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται κάποια βασικές έννοιες της θεωρίας των δικτύων Bayes όπως είναι ο d-διαχωρισμός και ο κανόνας της αλυσίδας. Για περισσότερες λεπτομέρειες και βαθύτερη κατανόηση της θεωρίας αυτής ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να αναφερθεί στα [96,98-100].

5.2.1 Αιτιατά δίκτυα και d-διαχωρισμός

Αιτιατά Δίκτυα

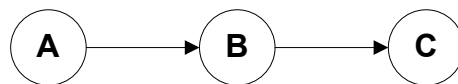
Ένα αιτιατό δίκτυο αποτελείται από ένα σύνολο μεταβλητών και ένα σύνολο κατευθυντικών συνδέσεων (εναλλακτικά ονομάζονται τόξα) μεταξύ των μεταβλητών. Μαθηματικά η δομή ονομάζεται κατευθυντικός γράφος. Για την περιγραφή των σχέσεων σε έναν κατευθυντικό γράφο χρησιμοποιείται η ορολογία των οικογενειακών σχέσεων: αν υπάρχει μια σύνδεση από το A στο B , τότε λέμε ότι ο B είναι παιδί του A και ότι ο A είναι γονιός του B .

Οι μεταβλητές αντιπροσωπεύουν προτάσεις (ή δειγματοχώρους) και μπορεί να έχουν οποιοδήποτε αριθμό καταστάσεων. Μια μεταβλητή μπορεί, για παράδειγμα, να είναι το χρώμα του αυτοκινήτου (καταστάσεις: μπλε, πράσινο, κόκκινο, καφέ), ο αριθμός των παιδιών σε μια συγκεκριμένη οικογένεια (καταστάσεις: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, >6), ή μια ασθένεια (καταστάσεις: βρογχίτιδα, φυματίωση, καρκίνος του πνεύμονα). Οι μεταβλητές μπορεί να έχουν ένα απαριθμητό ή ένα συνεχές σύνολο καταστάσεων. Εδώ θα ασχοληθούμε μόνο με το πρώτο είδος μεταβλητών.

Σε ένα αιτιατό δίκτυο, μια μεταβλητή αναπαριστά ένα σύνολο πιθανών καταστάσεων. Μια μεταβλητή είναι ακριβώς σε μία από αυτές τις καταστάσεις, η οποία μπορεί να είναι άγνωστη. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι συνδέσεων σε ένα αιτιατό δίκτυο οι οποίοι αναλύονται παρακάτω.

Σειριακές συνδέσεις

Από την κατάσταση που περιγράφεται στην Εικόνα 47 φαίνεται πως ο A έχει επιρροή στον B , ο οποίος με τη σειρά του επηρεάζει τον C . Προφανώς, τα στοιχεία που σχετίζονται με τον A θα επηρεάσουν την βεβαιότητα του B , η οποία στη συνέχεια θα επηρεάσει την βεβαιότητα του C . Ομοίως, τα στοιχεία που σχετίζονται με τον C θα επηρεάσουν την βεβαιότητα του A μέσω του B . Ωστόσο, στην περίπτωση που η κατάσταση του B είναι γνωστή, τότε το κανάλι είναι αποκλεισμένο, και ο A με τον C είναι ανεξάρτητοι. Επομένως ο A και ο C είναι d-διαχωρισμένοι δεδομένου του B . Όταν η κατάσταση μιας μεταβλητής είναι γνωστή, τότε λέμε ότι η μεταβλητή αυτή έχει λάβει υπόσταση (instantiated).

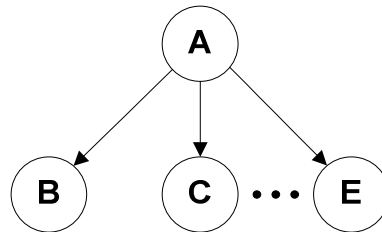


Εικόνα 47: Σειριακή σύνδεση

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η πληροφορία μπορεί να μεταδοθεί μέσα από μία σειριακή σύνδεση εκτός και αν η κατάσταση της μεταβλητής στη σύνδεση (B στην περίπτωση μας) είναι γνωστή.

Αποκλίνουσες συνδέσεις

Η κατάσταση που εμφανίζεται στην Εικόνα 48 ονομάζεται αποκλίνουσα σύνδεση. Όλα τα παιδιά του A μπορούν να επηρεαστούν από τα διαθέσιμα στοιχεία για τα υπόλοιπα παιδιά του A εκτός εάν η κατάσταση του A είναι γνωστή. Δηλαδή, οι B, C, \dots, E είναι d-διαχωρισμένοι δεδομένου του A .

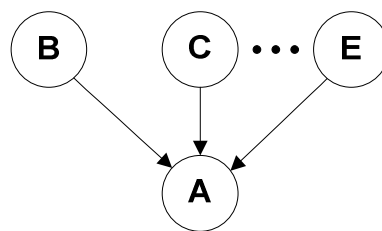


Εικόνα 48: Αποκλίνουσα σύνδεση

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η πληροφορία μπορεί να μεταδοθεί μέσα από μία αποκλίνουσα σύνδεση εκτός και αν αυτή έχει λάβει υπόσταση, δηλαδή η κατάσταση της μεταβλητής A είναι γνωστή.

Συγκλίνουσες συνδέσεις

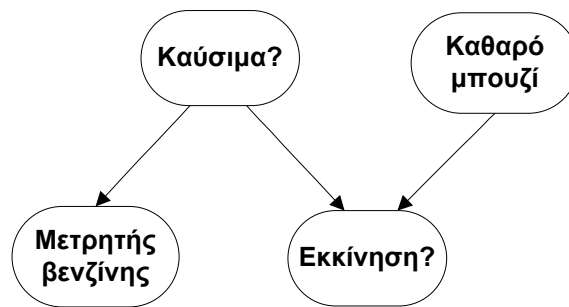
Η περιγραφή της κατάστασης στην Εικόνα 49 απαιτεί λίγο περισσότερη προσοχή. Αν δεν είναι τίποτα γνωστό σχετικά με τον A , τότε οι γονείς B, \dots, E είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους, δηλαδή αποδεικτικά στοιχεία σχετικά με έναν από αυτούς δεν μπορεί να επηρεάσει τις βεβαιότητες των άλλων μέσω του A .



Εικόνα 49: Συγκλίνουσα σύνδεση

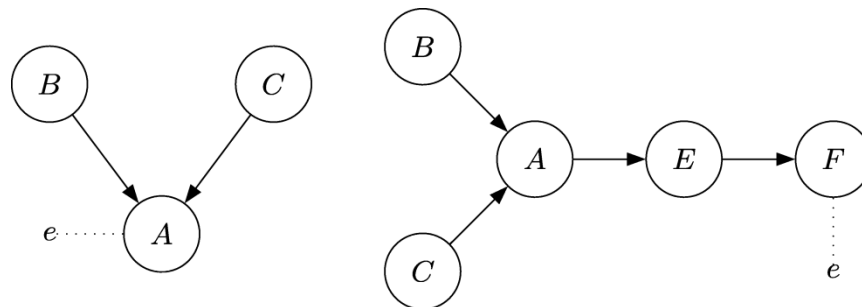
Η γνώση μίας πιθανή αιτίας ενός γεγονότος δεν μας δίνει περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις άλλες πιθανές αιτίες. Ωστόσο, αν είναι γνωστές οι συνέπειες, τότε οι πληροφορίες σχετικά με μια πιθανή αιτία μπορεί να μας δώσουν κάποιες πληροφορίες σχετικά με τις άλλες αιτίες. Αυτή η ιδιότητα ονομάζεται “αποσαφήνιση” (explaining away) και μπορεί να γίνει καλύτερα κατανοητή με το ακόλουθο παράδειγμα του προβλήματος εκκίνησης του αυτοκινήτου που φαίνεται και στην Εικόνα 50. Το αυτοκίνητο δεν μπορεί να ξεκινήσει και τα πιθανά αίτια περιλαμβάνουν βρώμικο μπουζί και άδεια δεξαμενή καυσίμων. Αν λάβουμε τώρα πληροφορίες ότι υπάρχουν καύσιμα στο ρεζερβουάρ, τότε η βεβαιότητα μας ότι το μπουζί είναι βρώμικο θα αυξηθεί (διότι αυτό εξηγεί για ποιο λόγο το αυτοκίνητο δεν μπορεί να ξεκινήσει). Αντιθέτως, αν έχουμε την πληροφορία ότι δεν υπάρχει καύσιμο στο αυτοκίνητο, τότε η βεβαιότητα μας ότι το μπουζί

είναι βρώμικο θα μειωθεί (δεδομένου ότι η έλλειψη καυσίμων εξηγεί γιατί το αυτοκίνητο δεν μπορεί να ξεκινήσει).



Εικόνα 50: Αιτιατό δίκτυο για πρόβλημα εκκίνησης αυτοκινήτου

Στην Εικόνα 51 παρουσιάζονται δύο παραδείγματα συγκλίνουσας σύνδεσης. Αξίζει να προσέξει κανείς ότι στο δεύτερο παράδειγμα παρατηρούμε τον A μόνο με έναν έμμεσο τρόπο, μέσω πληροφορίας που σχετίζεται με τον F . Γνωρίζοντας την κατάσταση του F μας λέει κάτι για την κατάσταση του E , η οποία με τη σειρά της μας λέει κάτι για τον A .



Εικόνα 51: Παραδείγματα συγκλίνουσας σύνδεσης

Το συμπέρασμα λοιπόν είναι ότι η πληροφορία μπορεί να μεταδοθεί μέσα από μία συγκλίνουσα σύνδεση μόνο αν είτε η μεταβλητή στη σύνδεση είτε μια από τις απογόνους της έχει λάβει ένδειξη.

Κριτήριο d-διαχωρισμού

Οι τρεις προηγούμενες περιπτώσεις, καλύπτουν όλους τους δυνατούς τρόπους με τους οποίους μεταδίδονται οι ενδείξεις σε ένα δίκτυο μέσω μιας μεταβλητής. Ακολουθώντας αυτούς τους κανόνες είναι δυνατόν να αποφασιστεί για κάθε ζεύγος μεταβλητών σε ένα αιτιατό δίκτυο αν είναι ανεξάρτητες ή όχι δεδομένων των ενδείξεων που υπεισέρχονται στο δίκτυο. Οι κανόνες αυτοί συμπεριλαμβάνονται στον ακόλουθο ορισμό.

Ορισμός d-διαχωρισμού: Δύο ξεχωριστές μεταβλητές A και B ενός αιτιατού δικτύου είναι d-διαχωρισμένες αν για όλες τις διαδρομές μεταξύ της A και B , υπάρχει μια ενδιάμεση μεταβλητή V (διαφορετική από τις A και B), έτσι ώστε είτε

- η σύνδεση είναι σειριακή ή αποκλίνουσα και η V έχει λάβει υπόσταση ή
- η σύνδεση είναι συγκλίνουσα, και ούτε η V ούτε καμία από τις απογόνους της έχει λάβει ένδειξη.

Αν η A και η B δεν είναι d-διαχωρισμένες, τότε τις αποκαλούμε d-συνδεδεμένες.

5.2.2 Ορισμός δικτύων Bayes

Ένα αιτιατό δίκτυο εκτός από ποιοτική πλευρά, η οποία δίνεται με τη δομή του, έχει και ποσοτική η οποία ονομάζεται *δύναμη* και μπορεί να εκφραστεί με την επισύναψη αριθμών στους συνδέσμους του.

Η μοντελοποίηση σε έναν τομέα μπορεί να περιέχει κύκλους ανάδρασης. Οι κύκλοι ανάδρασης είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν ποσοτικά. Για τα αιτιατά δίκτυα δεν έχει αναπτυχθεί αλγόριθμος που να λαμβάνει υπόψη του τους κύκλους ανάδρασης, αλλά συγκεκριμένα μη αιτιατά μοντέλα έχουν προταθεί ώστε να χειριστούν αυτό το θέμα. Τα δίκτυα Bayes εξ' ορισμού είναι δίκτυα τα οποία δεν περιέχουν κύκλους.

Ορισμός δικτύου Bayes

Ένα Bayesian δίκτυο αποτελείται από τα ακόλουθα:

- Ένα σύνολο από μεταβλητές και ένα σύνολο από κατευθυντικές ακμές μεταξύ των μεταβλητών.
- Κάθε μεταβλητή έχει ένα πεπερασμένο σύνολο αμοιβαία αποκλειόμενων καταστάσεων.
- Οι μεταβλητές μαζί με τις κατευθυντικές ακμές σχηματίζουν έναν κατευθυντικό ακυκλικό γράφο (directed acyclic graph – DAG). Ένας κατευθυντικός γράφος είναι ακυκλικός αν δεν υπάρχει κατευθυντικό μονοπάτι $A_1 \rightarrow \dots \rightarrow A_n$ τέτοιο ώστε $A_1 = A_n$.
- Σε κάθε μεταβλητή A με γονείς B_1, \dots, B_n προσκολλάται ένας πίνακας της δεσμευμένης πιθανότητας $P(A|B_1, \dots, B_n)$.

Αξίζει να σημειωθεί πως στην περίπτωση που η μεταβλητή A δεν έχει γονείς, τότε ο πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας περιορίζεται στον πίνακα προγενέστερης πιθανότητας $P(A)$. Υπάρχουν ισχυρισμοί πως οι προγενέστερες πιθανότητες εισάγουν μια μη επιθυμητή πόλωση στο μοντέλο και για το λόγο αυτό έχουν εφευρεθεί υπολογισμοί ώστε αν αποφευχθεί αυτή η πόλωση. Ωστόσο, οι προγενέστερες πιθανότητες είναι αναγκαίες όχι τόσο για μαθηματικούς λόγους αλλά κυρίως διότι οι προγενέστερες εκτιμήσεις είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι της ανθρώπινης συλλογιστικής που σχετίζονται με την βεβαιότητα.

Ο ορισμός των δικτύων Bayes δεν αναφέρεται σε αιτιότητα, και δεν υπάρχει απαίτηση ότι οι σύνδεσμοί του θα αντιπροσωπεύουν αιτιώδη επίδραση. Αυτό σημαίνει πως κατά την κατασκευή της δομής ενός μοντέλου Bayesian δικτύου, δεν απαιτείται οι σύνδεσμοι να πηγαινούν προς μια αιτιώδη κατεύθυνση. Ωστόσο, θα πρέπει στη συνέχεια να ελεγχθούν οι ιδιότητες d-διαχωρισμού του μοντέλου και να εξασφαλιστεί ότι ανταποκρίνονται στην αντίληψή μας για τις υπό συνθήκη ανεξάρτητες ιδιότητες. Το

μοντέλο δεν θα πρέπει να περιλαμβάνει υπό συνθήκη ανεξαρτησίες οι οποίες δεν ισχύουν στον πραγματικό κόσμο.

Αυτό σημαίνει επίσης ότι αν οι A και B είναι d-διαχωρισμένες δεδομένου των ενδείξεων e , τότε ο υπολογισμός πιθανότητας που χρησιμοποιείται για τα Bayesian δίκτυα οφείλει να ακολουθεί την παρακάτω σχέση:

$$P(A|e) = P(A|B, e) \quad (5.12)$$

5.2.3 Κανόνας Αλυσίδας

Για τις κατανομές πιθανότητας σε ένα σύνολο μεταβλητών υπάρχει μια εξίσωση η οποία ονομάζεται *κανόνας της αλυσίδας*. Για τα δίκτυα Bayes η εξίσωση αυτή έχει μια ειδική μορφή. Αρχικά δίνεται ο ορισμός για τον γενικό κανόνα της αλυσίδας και στη συνέχεια δίνεται ο κανόνας της αλυσίδας για τα δίκτυα Bayes.

Ο γενικός κανόνας της αλυσίδας

Έστω ένα σύνολο μεταβλητών $U = \{A_1, \dots, A_n\}$. Τότε για κάθε κατανομή πιθανότητας $P(U)$ ισχύει

$$P(U) = P(A_n | A_1, \dots, A_{n-1})P(A_{n-1} | A_1, \dots, A_{n-2}) \dots P(A_2 | A_1)P(A_1) \quad (5.13)$$

Ο κανόνας της αλυσίδας για τα δίκτυα Bayes

Έστω BN ένα δίκτυο Bayes με μεταβλητές $U = \{A_1, \dots, A_n\}$. Τότε το BN ορίζει μία μοναδική από κοινού κατανομή πιθανότητας $P(U)$ που δίνεται από το γινόμενο όλων των πινάκων υπό συνθήκης πιθανότητας που ορίζονται στο BN:

$$P(U) = \prod_{i=1}^n P(A_i | pa(A_i)) \quad (5.14)$$

όπου $pa(A_i)$ είναι οι γονείς του A_i στο BN και η $P(U)$ αντανακλά τις ιδιότητες του BN.

5.2.4 Θέματα προς συζήτηση

Σε αυτή την παράγραφο γίνεται αναφορά σε κάποια προβλήματα που προκύπτουν κατά την ανάπτυξη ενός συστήματος που βασίζεται σε ένα δίκτυο Bayes. Αρχικά δίνονται τα βήματα κατασκευής του δικτύου και στη συνέχεια γίνεται συζήτηση γύρω από κάποια από αυτά τα προβλήματα.

Για την κατασκευή ενός δικτύου Bayes ακολουθούνται τα τρία παρακάτω βήματα:

- **Βήμα 1: Καθορισμός των μεταβλητών του δικτύου και των τιμών τους.** Συνήθως οι μεταβλητές του δικτύου διακρίνονται σε τρεις τύπους: μεταβλητές ερωτημάτων, ενδείξεων και ενδιάμεσες. Μια *μεταβλητή ερωτήματος* (query variable) είναι αυτή για την οποία πρέπει να γίνουν κάποια ερωτήματα, όπως ο υπολογισμός της περιθώριας πιθανότητάς της. Μια *μεταβλητή ένδειξης* (evidence variable) είναι αυτή για την οποία πρέπει να υπάρχουν στοιχεία που εισέρχονται στη συνέχεια στο δίκτυο. Τέλος, μια *ενδιάμεση μεταβλητή* (intermediary variable) δεν είναι ούτε μεταβλητή ερωτήματος ούτε ένδειξης και χρησιμοποιείται σαν βοηθητική στη διαδικασία μοντελοποίησης του δικτύου, αναλύοντας τη σχέση μεταξύ των δύο άλλων τύπων μεταβλητών. Οι μεταβλητές ερωτημάτων και ενδείξεων καθορίζονται συνήθως κατευθείαν από τη διατύπωση του προβλήματος. Ο καθορισμός των ενδιάμεσων μεταβλητών είναι λιγότερο εμφανής και εξαρτάται από λεπτές αποφάσεις μοντελοποίησης.
- **Βήμα 2: Καθορισμός της δομής του δικτύου (ακμών).** Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι βολικό να υπάρχει μία σχέση αιτίας-αποτελέσματος κατά το σχηματισμό της δομής του δικτύου (και συνήθως αυτό γίνεται), χωρίς όμως αυτό να είναι υποχρεωτικό. Επομένως σε αυτό το βήμα για τον καθορισμό της δομής του δικτύου αρκεί να απαντηθεί το ακόλουθο ερώτημα που αφορά κάθε μεταβλητή X του δικτύου: Ποιο είναι το σύνολο των μεταβλητών που θεωρούνται οι άμεσες αιτίες του X ;
- **Βήμα 3: Καθορισμός των πινάκων πιθανότητας.** Η δυσκολία και η αντικειμενικότητα αυτού του βήματος ποικίλει σημαντικά από το ένα πρόβλημα στο άλλο. Υπάρχουν προβλήματα στα οποία οι πίνακες της υπό συνθήκη πιθανότητας είναι ορισμένοι πλήρως από την διατύπωση του προβλήματος από αντικειμενικές παρατηρήσεις και άλλα προβλήματα στα οποία οι πίνακες αυτοί αντανακλούν υποκειμενικές εκτιμήσεις.

Όπως είναι φανερό και από τα παραπάνω βήματα κατασκευής ενός δικτύου Bayes μία σειρά προβλημάτων μπορεί να προκύψουν. Ένα σημαντικό θέμα είναι ο καθορισμός των πινάκων πιθανότητας του δικτύου. Υπάρχει πολύ σκέψη γύρω από την ερώτηση “Από πού προέρχονται οι αριθμοί;”. Η απάντηση στην ουσία δόθηκε στο βήμα 3 και είναι ότι μπορεί να προέρχονται από διαφορετικές πηγές, όπως από διαθέσιμα στοιχεία σε βάσεις δεδομένων ή από αποτελέσματα πειραμάτων (αντικειμενικά δεδομένα), πράγμα σπάνιο, είτε να προέρχονται από υποκειμενικές εκτιμήσεις κάποιων ειδικών. Σε όλες σχεδόν τις εφαρμογές η εξαγωγή της γνώσης από τους ειδικούς είναι μία χρονοβόρα διαδικασία, επιρρεπής σε σφάλματα και ακρίβη.

Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα που εμφανίζεται κατά τη κατασκευή μοντέλων με βάση τα δίκτυα Bayes είναι το πιθανά μεγάλο μέγεθος των πινάκων πιθανότητας που πρέπει να καθοριστούν. Για παράδειγμα, έστω ότι υπάρχει μία μεταβλητή E με γονείς C_1, \dots, C_n και έστω ότι κάθε μία από αυτές τις μεταβλητές έχει δύο τιμές (αληθής ή ψευδής). Τότε για τον πλήρη καθορισμό του πίνακα της υπό συνθήκη πιθανότητας της μεταβλητής E χρειάζονται 2^n ανεξάρτητες παράμετροι. Στον Πίνακα 14 δίνονται ενδεικτικά κάποια μεγέθη των υπό συνθήκη πινάκων πιθανότητας για διαφορετικό αριθμό γονέων n .

Αριθμός γονέων: n	Αριθμός γραμμών πίνακα
2	4
3	8
6	64
10	1.024
20	1.048.576
30	1.073.741.824

Πίνακας 14: Μέγεθος πίνακα πιθανότητας με βάση τον αριθμό των γονέων μιας μεταβλητής

Επομένως, καθώς ο αριθμός των γονέων n μεγαλώνει προκύπτουν προβλήματα τόσο στη μοντελοποίηση όσο και στο υπολογιστικό κόστος. Πρώτα θα εμφανιστεί το πρόβλημα στη μοντελοποίηση καθώς ένας πίνακας με 1.024 γραμμές σπάνια θα αποτελέσει υπολογιστικό πρόβλημα αλλά ο καθορισμός των τιμών του πίνακα αυτού από κάποιον ειδικό είναι δύσκολο εγχείρημα.

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι επίλυσης του προβλήματος αυτού. Ένας από αυτούς είναι η μέθοδος του θορυβώδους-ή (noisy-or), ο οποίος ακολουθεί, ενώ για τους άλλους τρόπους ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να απευθυνθεί στο [101].

Θορυβώδεις-ή

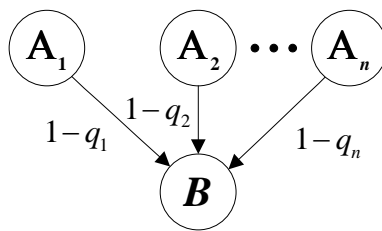
Όταν μια μεταβλητή B έχει αρκετούς γονείς (βλέπε Εικόνα 52) πρέπει να καθοριστεί η πιθανότητα $P(B | A_1, \dots, A_n)$ για κάθε συνδυασμό των γονέων αυτών. Ας θεωρήσουμε ότι A_1, \dots, A_n είναι δυαδικές μεταβλητές (παίρνουν τις τιμές 0 και 1). Κάθε γεγονός $A_i = 1$ προκαλεί $B = 1$ εκτός αν κάποιος αναστολέας (inhibitor) το εμποδίσει με πιθανότητα q_i . Δηλαδή, $P(B = 0 | A_i = 1) = q_i$. Υποθέτουμε ότι όλοι οι αναστολείς είναι ανεξάρτητοι, επομένως ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$P(B = 0 | A_1, A_2, \dots, A_n) = \prod_{j \in Y} q_j \quad (5.15)$$

όπου $Y = \{j \in \{1, \dots, n\} | A_j = 1\}$. Για καλύτερη κατανόηση του θορυβώδους-ή δίνεται το ακόλουθο παράδειγμα:

$$\begin{aligned} P(B = 1 | A_1 = 1, A_2 = 1, A_3 = \dots = A_n = 0) &= \\ &= 1 - P(B = 0 | A_1 = 1, A_2 = 1, A_3 = \dots = A_n = 0) = \\ &= 1 - q_1 \cdot q_2 \end{aligned} \quad (5.16)$$

Χρησιμοποιώντας την τεχνική του “θορυβώδους-ή”, ο αριθμός των πιθανοτήτων που είναι προς εκτίμηση αυξάνεται γραμμικά και όχι εκθετικά με τον αριθμό των γονέων.



Εικόνα 52: Γενική περιγραφή του θορυβώδους-ή

5.3 Εκπαίδευση δικτύων Bayes

Τα δίκτυα Bayes αποτελούν αποδοτικά μοντέλα για αυτοματοποιημένη συλλογιστική υπό αβεβαιότητα. Ένα δίκτυο Bayes μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένα αποδοτικό εργαλείο για αναπαράσταση γνώσης και εξαγωγή συμπεράσματος. Δυστυχώς η κατασκευή ενός τέτοιου δικτύου μπορεί να είναι μια αρκετά επίπονη εργασία, ειδικά όταν πρόκειται για ένα μεγάλο δίκτυο. Στην απλούστερη περίπτωση, ένα δίκτυο Bayes μπορεί να καθοριστεί από κάποιον ειδικό και μετά είναι έτοιμο να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή συμπεράσματος. Σε άλλες περιπτώσεις, η διαδικασία καθορισμού του δικτύου είναι πολύ πολύπλοκη για τους ανθρώπους. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιείται σημαντική έρευνα τα τελευταία χρόνια πάνω στην αυτοματοποιημένη κατασκευή δικτύων Bayes. Στο επίκεντρο αυτής της έρευνας βρίσκεται η αυτοματοποιημένη κατασκευή μοντέλων από ένα συνδυασμό δεδομένων και γνώσης των ειδικών του εκάστοτε τομέα.

Σε ένα δίκτυο Bayes ο κατευθυντικός ακυκλικός γράφος ονομάζεται η **δομή** του δικτύου και οι τιμές των πινάκων των υπό συνθήκη πιθανοτήτων ονομάζονται **παραμέτροι**. Στην παράγραφο αυτή μελετάται το πρόβλημα της εκπαίδευσης ενός δικτύου Bayes με τη χρήση δεδομένων [104,105]. Η εκπαίδευση ενός δικτύου Bayes θεωρείται ως η διαδικασία αναγνώρισης της δομής του δικτύου και των παραμέτρων αυτού με τη χρήση δεδομένων. Όπως γίνεται φανερό υπάρχουν δύο είδη εκπαίδευσης δικτύων Bayes τα οποία θα παρουσιαστούν συνοπτικά στη συνέχεια: το ένα αφορά τη δομή του δικτύου και το άλλο τις παραμέτρους αυτού.

5.3.1 Εκπαίδευση δομής

Μέχρι τώρα, στο κεφάλαιο αυτό, γινόταν η υπόθεση ότι η δομή του υπό εξέταση δικτύου είναι γνωστή. Ωστόσο, αυτή η παραδοχή δεν ισχύει γενικά και μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση είναι ότι οποιαδήποτε προτεινόμενη δομή είναι δοκιμαστική και υπόκειται σε επανεξέταση όταν υπάρχουν περισσότερα δεδομένα. Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις κατά τις οποίες αρχικά δεν είναι διαθέσιμη η κατάλληλη τεχνογνωσία στον συγκεκριμένο τομέα, οπότε πρέπει εξ αρχής να εξετάζονται τα δεδομένα ώστε να προτείνονται κάποιες κατάλληλες ποιοτικές υποθέσεις μοντελοποίησης, όπως για παράδειγμα υποθέσεις για υπό συνθήκη ανεξαρτησία.

Η αυτοματοποιημένη εκπαίδευση της δομής του γράφου ενός δικτύου Bayes αποτελεί μια πρόκληση η οποία ανήκει στην ευρύτερη περιοχή της μηχανικής μάθησης (machine learning). Η επικράτηση και η σημασία επίλυσης τέτοιου είδους προβλημάτων αντικατοπτρίζεται στο ταχέως αναπτυσσόμενο ενδιαφέρον και την ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα αυτό.

Στόχος της παρούσας ενότητας δεν είναι να υπεισέλθει σε λεπτομέρειες που αφορούν κάποιες συγκεκριμένες μεθόδους, αλλά να παρουσιάσει ένα γενικό πλαίσιο και να υποδειχθούν κάποιες σημαντικές κατευθύνσεις που αφορούν την εκπαίδευση της δομής του δικτύου.

Η βασική ιδέα κατά την κατασκευή ενός κατευθυντικού γράφου είναι να γίνει διάκριση μεταξύ των τριών διαφορετικών τρόπων με τους οποίους μπορούν να συνδεθούν οι γειτονικές τριάδες σε αυτό το γράφο. Οι τρόποι αυτοί είναι οι ακόλουθοι:

$$\mathbf{A.} \quad X \rightarrow Y \rightarrow Z$$

$$\mathbf{B.} \quad X \leftarrow Y \rightarrow Z$$

$$\mathbf{G.} \quad X \rightarrow Y \leftarrow Z$$

Όπως είδαμε και προηγουμένως στο κεφάλαιο αυτό, οι συνδέσεις **A** και **B** αντιπροσωπεύουν τις ίδιες εξαρτήσεις (οι X και Z είναι ανεξάρτητες δεδομένης της Y) και επομένως δεν μπορούν να διακριθούν μεταξύ τους. Η σύνδεση **G**, ωστόσο, μπορεί να αναγνωριστεί μονοσήμαντα, από τη στιγμή που οι X και Z είναι περιθώρια ανεξάρτητες (marginally independent) και όλα τα άλλα ζευγάρια είναι εξαρτημένα. Επομένως, ενώ ο σκελετός (ο γράφος με τις συνδέσεις χωρίς τα βελόκια που υποδηλώνουν την κατεύθυνση) των παραπάνω τριάδων είναι ολόιδιος, η κατευθυντικότητα των συνδέσεων είναι μερικώς αναγνωρίσιμη. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι οι οποίες καθορίζουν συστηματικά τον σκελετό του γράφου και ύστερα κατευθύνουν τις συνδέσεις των οποίων η κατευθυντικότητα ορίζεται από τις παρατηρούμενες υπό συνθήκη ανεξαρτησίες.

Η πιο γνωστή μέθοδος από αυτές είναι ο PC αλγόριθμος των Spirtes και Glymour [106]. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ένας παρόμοιος αλγόριθμος, ο IG αλγόριθμος ο οποίος αναπτύχθηκε ανεξάρτητα από τους Verma και Pearl [107]. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι οι αλγόριθμοι αυτοί λαμβάνουν υπόψη και κάποιους περιορισμούς οι οποίοι μπορεί να οριστούν από κάποιον ειδικό. Για παράδειγμα, μπορεί να είναι εκ των προτέρων γνωστή η σχέση δύο μεταβλητών του δικτύου και η κατεύθυνση της σύνδεσής τους, γεγονός το οποίο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου. Στη συνέχεια ακολουθεί μια σκιαγράφηση των βημάτων του PC αλγορίθμου:

- Αρχικά καθορίζονται τα δεδομένα για την εκπαίδευση.
- Πραγματοποιούνται στατιστικές δοκιμές για την υπό συνθήκη ανεξαρτησία ζευγαριών κόμβων (X , Y) δεδομένου κάποιου συνόλου άλλων κόμβων S_{XY} .
- Κατασκευάζεται ένας μη κατευθυντικός γράφος που όπως προαναφέρθηκε ονομάζεται σκελετός: οι κόμβοι X και Y είναι συνδεδεμένοι με κάποια ακμή αν και μόνο αν (1) η ακμή απαιτείται από κάποιους περιορισμούς, ή (2) η ακμή επιτρέπεται από τους περιορισμούς και καμία σχέση υπό

συνθήκη ανεξαρτησίας για τους (X,Y) δεδομένου του συνόλου S_{XY} δεν βρέθηκε στο προηγούμενο βήμα.

- Οι ακμές των οποίων οι κατευθύνσεις έχουν καθοριστεί από τους περιορισμούς, γίνονται κατευθυντικές σύμφωνα με αυτούς (εκτός αν οι περιορισμοί δημιουργούν κατευθυντικούς κύκλους).
- Εντοπίζονται οι συγκλίνουσες ακμές (όπως φαίνεται στην περίπτωση Γ παραπάνω) και οι προκύπτουσες κατευθύνσεις. Οι ακμές κατευθύνονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μη δημιουργούνται κατευθυντικοί κύκλοι.
- Τα προηγούμενα βήματα καταλήγουν στον σχηματισμό ενός μερικώς κατευθυντικού γράφου. Η κατευθυντικότητα των υπόλοιπων ακμών γίνεται αυθαίρετα (μία τη φορά, δηλαδή κάθε φορά που μία ακμή γίνεται κατευθυντική ακολουθεί ένα βήμα αναγνώρισης των προκύπτουσών κατευθύνσεων).

Η γνώση η οποία υπάρχει και είναι σχετική με τον τομέα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιορίσει το σύνολο των δικτύων που πρέπει να εκπαιδευτούν. Τέτοιου είδους γνώση μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον αλγόριθμο εκπαίδευσης για να επιλύσει τις ασάφειες (π.χ. επιλογή της κατεύθυνσης μίας ακμής). Η γνώση που αφορά τον εκάστοτε τομέα μπορεί να είναι γνώση της κατεύθυνσης μιας ακμής, της ύπαρξης ή απουσίας μιας ακμής, ή και τα δύο.

Όταν εκπαιδεύεται ένα δίκτυο από ένα σύνολο δεδομένων, σκοπός είναι να επιλεγεί η δομή που περιγράφει καλύτερα τα δεδομένα. Για το λόγο αυτό έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για την σύγκριση των διαφορετικών αυτών δομών (scoring functions). Οι μέθοδοι αυτές δίνουν ως αποτέλεσμα ένα μόνο αριθμό ο οποίος περιγράφει την καταλληλότητα της εκάστοτε δομής. Η πιο κοινή μέθοδος βαθμονόμησης μιας δομής είναι η εκ των υστέρων πιθανότητα της δομής δεδομένου των δεδομένων εκπαίδευσης. Κάποιες άλλες μέθοδοι είναι το κριτήριο πληροφορίας του Akaike και το κριτήριο Jeffreys-Schwarz ή αλλιώς Bayesian κριτήριο πληροφορίας. Το πρώτο κριτήριο δεν λαμβάνει υπόψη την πολυπλοκότητα του δικτύου ενώ τα άλλα δύο τη λαμβάνουν.

Η πολυπλοκότητα της διαδικασίας εκπαίδευσης εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό των μεταβλητών του δικτύου προς εκπαίδευση. Για παράδειγμα, όταν υπάρχουν μόνο λίγες μεταβλητές στο υπό εξέταση δίκτυο τότε μπορούν να υπολογιστούν οι βαθμολογίες όλων των πιθανών γράφων και να επιλεγεί αυτός με τη μεγαλύτερη βαθμολογία. Ωστόσο, όταν ο αριθμός των μεταβλητών δεν είναι μικρός το να εξεταστούν όλες οι περιπτώσεις και να βρεθεί ο καταλληλότερος γράφος (αυτός με τη μεγαλύτερη βαθμολογία) είναι υπολογιστικά δύσκολο, αν όχι αδύνατο. Ένας τρόπος επίλυσης αυτού του προβλήματος είναι η ανάπτυξη αλγορίθμων αναζήτησης (search algorithms).

Εάν το δίκτυο είναι μικρό και τα δεδομένα πολλά τότε μπορεί μία δομή να είναι πολύ πιο κατάλληλη από μία άλλη. Σε περίπτωση όμως που υπάρχουν λίγα δεδομένα τότε μπορεί δύο διαφορετικά μοντέλα να έχουν πολύ κοντινές βαθμολογίες. Σε αυτή την περίπτωση είναι κάπως αυθαίρετη η επιλογή του ενός μοντέλου έναντι του άλλου και φαντάζει πιο λογική μια διαδικασία εξαγωγής του σταθμισμένου μέσου των δύο αυτών μοντέλων. Στην περίπτωση που οι πιθανές δομές είναι πολλές δεν μπορεί να υπολογιστεί ο

σταθμισμένος μέσος όλων αυτών και θα πρέπει να εφαρμοστεί μια διαδικασία αναζήτησης ώστε να επιλεγούν οι πιο πιθανές από αυτές.

Τέλος, σημαντικό ρόλο στην διαδικασία εκπαίδευσης της δομής ενός δικτύου παίζει το γεγονός αν τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία εκπαίδευσης είναι πλήρη ή ελλιπή. Αν γίνει η υπόθεση ότι κάποια τμήματα των δεδομένων λείπουν τυχαία, τότε στην περίπτωση που τα τμήματα είναι μικρά ο πιο απλός τρόπος διαχείρισης αυτής της κατάστασης είναι η εφαρμογή του νόμου της ολικής πιθανότητας (total probability law). Όμως στην περίπτωση που τα τμήματα των δεδομένων που λείπουν είναι σημαντικά, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν προσεγγιστικές μέθοδοι όπως είναι οι τεχνικές Monte Carlo.

5.3.2 Εκπαίδευση παραμέτρων

Από τη στιγμή που έχει καθοριστεί η δομή του δικτύου, είτε μέσω εκπαίδευσης είτε είναι γνωστή εκ των προτέρων, για να καθοριστεί πλήρως ένα δίκτυο Bayes αυτό που απομένει είναι ο καθορισμός των πινάκων πιθανότητας, δηλαδή των παραμέτρων του δικτύου. Ο καθορισμός αυτών των παραμέτρων από ειδικούς μπορεί να είναι αρκετά επίπονη διαδικασία ή ακόμα και αδύνατη στην περίπτωση που το δίκτυο είναι μεγάλο. Για το λόγο αυτό οι επιστήμονες διατύπωσαν μεθόδους για τον καθορισμό των παραμέτρων μέσα από εκπαίδευση από δεδομένα.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να γίνει η εκτίμηση των παραμέτρων ενός δικτύου Bayes, οι οποίες μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κυρίως κατηγορίες, με βάση τη θεμελιώδη λογική από την οποία προκύπτουν. Η πρώτη κατηγορία στηρίζεται στη θεωρία εκτίμησης της μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood estimation), ενώ η δεύτερη βασίζεται στην κλασική θεωρία του Bayes. Η απευθείας μεγιστοποίηση της πιθανοφάνειας (ή αλλιώς της εκ των υστέρων πιθανότητας) είναι συχνά πολύπλοκη διαδικασία όταν υπάρχουν μεταβλητές που δεν μπορούν να παρατηρηθούν.

Η μέθοδος η οποία ανήκει στην πρώτη κατηγορία και χρησιμοποιείται ευρέως για την εκπαίδευση των παραμέτρων του δικτύου βασίζεται στον EM αλγόριθμο [108] και αναπτύχθηκε από τον Lauritzen [109]. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για την εκτίμηση των παραμέτρων ειδικά στην περίπτωση που τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα για εκπαίδευση είναι ελλιπή.

Στην ουσία το βήμα E της παρούσας μεθόδου έχει ως στόχο να υπολογίσει την τρέχουσα αναμενόμενη τιμή της συνάρτησης πιθανοφάνειας (likelihood function) δεδομένης της αρχικής εκτίμησης, ενώ το βήμα M έχει ως στόχο τη μεγιστοποίηση της τιμής αυτής δίνοντας έτσι την επόμενη εκτίμηση. Τα βήματα E και M εναλλάσσονται μέχρι να παρατηρηθεί σύγκλιση ή να ξεπεραστεί ένα προκαθορισμένο όριο επαναλήψεων.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι όταν εκτός από δεδομένα είναι διαθέσιμη και γνώση στον συγκεκριμένο τομέα από κάποιον ειδικό, τότε αυτή μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί στη μέθοδο αυτή του Lauritzen.

Στη δεύτερη κατηγορία μεθόδων για την εκπαίδευση των παραμέτρων του δικτύου ανήκει η Bayesian προσέγγιση. Σύμφωνα με αυτήν, για την εκτίμηση των παραμέτρων του δικτύου, πρέπει αρχικά να

κωδικοποιηθεί η αβεβαιότητά μας για τις παραμέτρους θ του δικτύου σε μία αρχική κατανομή (prior distribution) $p(\theta)$ και έπειτα να γίνει χρήση των δεδομένων d για την ενημέρωση αυτής της κατανομής και τελικά να αποκτηθεί η εκ των υστέρων κατανομή (posterior distribution) $p(\theta|d)$ χρησιμοποιώντας το θεώρημα του Bayes.

Τέλος, στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί πως η προσέγγιση αυτή μπορεί να είναι υπολογιστικά ακριβή, και μάλιστα σε περίπτωση που τα δεδομένα εκπαίδευσης είναι ελλιπή να γίνεται υπολογιστικά αδύνατη και να απαιτούνται κάποιες προσεγγίσεις.

5.4 Συστήματα βασισμένα σε δίκτυα Bayes

Οι αλγόριθμοι σύντηξης υψηλού επιπέδου αποτελούν στην ουσία τη λεπτή διαχωριστική γραμμή μεταξύ των αλγορίθμων σύντηξης χαμηλού επιπέδου (π.χ. ιχνηλασία) και των εφαρμογών. Για το λόγο αυτό οι αλγόριθμοι αυτοί πρέπει να δίνουν όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες (υψηλού επιπέδου) στις εφαρμογές. Προς αυτή την κατεύθυνση αναπτύχθηκαν και τα συστήματα που περιγράφονται στη συνέχεια.

Στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος SAFESPOT [37] αναπτύχθηκαν δύο συστήματα συλλογιστικής τα οποία βασίζονται σε δίκτυα Bayes. Τα συστήματα αυτά περιγράφονται αναλυτικά στην συνέχεια και είναι τα εξής:

- Εκτίμηση της πυκνότητας της κυκλοφορίας
- Ανίχνευση ομίχλης

Αξίζει να σημειωθεί πως με τη χρήση των δικτύων Bayes μπορεί να αναπτυχθεί μια πληθώρα από εφαρμογές στα ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων, γεγονός που αποτελεί μελλοντικό ερευνητικό πεδίο για τον συγγραφέα.

5.4.1 Εκτίμηση πυκνότητας κυκλοφορίας

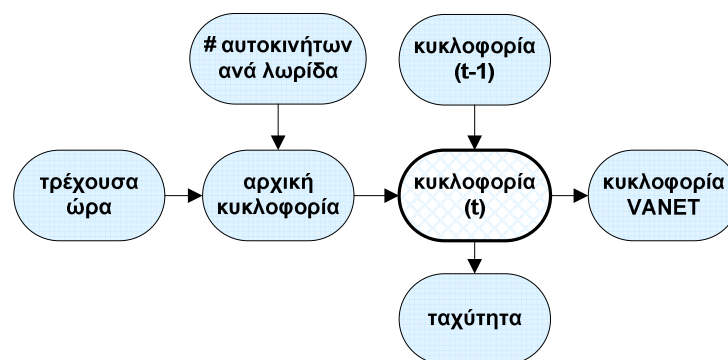
Σε αυτή την ενότητα γίνεται αρχικά μια περιγραφή του αλγορίθμου για την εκτίμηση της πυκνότητας της κυκλοφορίας και στη συνέχεια δίνονται κάποια αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν από προσομοιώσεις, καθώς δεν ήταν δυνατόν να γίνουν μετρήσεις με πραγματικά δεδομένα λόγω έλλειψης αρκετών εξοπλισμένων αυτοκινήτων.

5.4.1.1 Αλγόριθμος

Σκοπός του αλγορίθμου εκτίμησης της κυκλοφορίας είναι να υπολογίσει την πυκνότητα του κυκλοφοριακού φόρτου στην περιοχή γύρω από το υποκείμενο αυτοκίνητο. Ο υπολογισμός αυτός λαμβάνει

χώρα μέσα στο υποκείμενο αυτοκίνητο όπου χρησιμοποιούνται πληροφορίες που προέρχονται από τους αισθητήρες του, αφού έχει προηγηθεί επεξεργασία των δεδομένων τους (π.χ. ιχνηλασία των αυτοκινήτων), ενώ ταυτόχρονα λαμβάνονται υπόψη και πληροφορίες για την κυκλοφορία που εκπέμπονται από την υποδομή. Η εκτίμηση αυτή της πυκνότητας της κυκλοφορίας βασίζεται στη μέθοδο του δυναμικού δικτύου Bayes [102,103].

Για τον υπολογισμό της πυκνότητας της κυκλοφορίας χρειάζεται ο αριθμός των αυτοκινήτων που βρίσκονται κοντά στο υποκείμενο αυτοκίνητο και προέρχονται από τη μονάδα ιχνηλασίας, η ταχύτητα του υποκείμενου αυτοκινήτου, η τρέχουσα ώρα, η εκτίμηση πυκνότητας της κυκλοφορίας την προηγούμενη χρονική στιγμή καθώς και πληροφορίες για την κυκλοφορία από την υποδομή μέσω ασύρματων μηνυμάτων. Η δομή αυτού του δικτύου δίνεται στην Εικόνα 53.



Εικόνα 53: Δομή δικτύου Bayes για εκτίμηση πυκνότητας κυκλοφορίας

Ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται η εκτίμηση της πυκνότητας της κυκλοφορίας από τον αριθμό των αυτοκινήτων που έχουν εντοπιστεί και από τις πληροφορίες της υποδομής είναι λίγο πολύ εμφανής. Ο λόγος χρησιμοποίησης της τρέχουσας ώρας σαν πηγή εισόδου είναι ότι η πιθανότητα να έχει εμπλακεί το υποκείμενο αυτοκίνητο σε κυκλοφοριακή συμφόρηση είναι μεγαλύτερη όταν είναι ώρα αιχμής. Επιπλέον, σε περίπτωση που το υποκείμενο αυτοκίνητο κινείται με μεγάλη ταχύτητα η πιθανότητα ύπαρξης πυκνής κυκλοφορίας είναι μικρή σε αντίθεση με την περίπτωση που κινείται με μικρή ταχύτητα.

Από την Εικόνα 53 μπορεί εύκολα να παρατηρήσει κανείς την ύπαρξη μιας βοηθητικής μεταβλητής στο δίκτυο, αυτή της “αρχικής κυκλοφορίας”. Η μεταβλητή αυτή έχει ως στόχο να μειώσει τον πίνακα της υπό συνθήκη πιθανότητας της μεταβλητής “κυκλοφορία (t)” καθώς μειώνει τους γονείς της από τρεις σε δύο. Αυτή είναι μία από τις τεχνικές αντιμετώπισης του προβλήματος των πολύ μεγάλων πινάκων υπό συνθήκης πιθανότητας που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου.

Οι καταστάσεις στις οποίες μπορούν να βρεθούν οι μεταβλητές του δικτύου είναι οι ακόλουθες:

- **τρέχουσα ώρα:** ώρα αιχμής, όχι ώρα αιχμής
- **# αυτοκινήτων ανά λωρίδα:** ελάχιστα, κανονικά, πολλά
- **ταχύτητα:** χαμηλή, μεσαία, υψηλή
- **κυκλοφορία VANET:** άγνωστη, κανονική, σχηματισμός ουράς, αραιή, πυκνή
- **κυκλοφορία (αρχική, t-1, t):** αραιή, κανονική, πυκνή

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι οι πίνακες της υπό συνθήκη πιθανότητας του δικτύου αυτού προέκυψαν έπειτα από συζητήσεις ειδικών στα πλαίσια του SAFESPOT και δεν ήταν αποτέλεσμα εκπαίδευσης, καθώς δεν υπήρχαν διαθέσιμα τα απαραίτητα δεδομένα. Επιπλέον, έγιναν κάποιες αρχικές μετρήσεις ώστε να διορθωθούν ορισμένες πιθανότητες και οι μεταβάσεις μεταξύ διαφορετικών καταστάσεων (π.χ. από μέτρα σε πυκνή κυκλοφορία) να είναι πιο ομαλές.

5.4.1.2 Αποτελέσματα

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η έλλειψη αρκετών εξοπλισμένων αυτοκινήτων, ώστε να εξεταστεί ο αλγόριθμος εκτίμησης της πυκνότητας της κυκλοφορίας σε πραγματικές συνθήκες, οδήγησαν στην πραγματοποίηση προσομοιώσεων για τον έλεγχο του αλγορίθμου. Το σενάριο που προσομοιώθηκε ξεκινάει με το υποκείμενο αυτοκίνητο να οδηγεί μόνο του σε ένα δρόμο ο οποίος περιλαμβάνει δύο λωρίδες. Καθώς περνάει ο χρόνος, προστίθενται νέα αυτοκίνητα στο οδικό περιβάλλον του υποκείμενου αυτοκινήτου και αλλάζουν αντίστοιχα και οι πληροφορίες για την κυκλοφορία που προέρχονται από το VANET (σταδιακά από αραιή σε πυκνή κυκλοφορία). Επιπλέον, καθώς η κυκλοφορία αυξάνεται η ταχύτητα του υποκείμενου αυτοκινήτου μειώνεται. Περισσότερες πληροφορίες μπορεί κανείς να αντλήσει από τον Πίνακα 15 στον οποίο εμφανίζεται ο αριθμός του κύκλου επεξεργασίας, η εκτίμηση της πυκνότητας της κυκλοφορίας και η αντίστοιχη τιμή εμπιστοσύνης.

Αριθμός κύκλου επεξεργασίας	Εκτίμηση πυκνότητας κυκλοφορίας	Εμπιστοσύνη (πιθανότητα)
TACHYTHTA = 25 m/s, # AYTOKINHΤΩN = 0, VANET = XAMHΛH KYKΛOΦOPIA		
1	APAIH	0.965492
	...	
10	APAIH	0.987253
TACHYTHTA = 20 m/s, # AYTOKINHΤΩN = 3, VANET = XAMHΛH KYKΛOΦOPIA		
11	APAIH	0.928103
	...	
15	APAIH	0.909602
TACHYTHTA = 18 m/s, # AYTOKINHΤΩN = 6, VANET = KANONIKH KYKΛOΦOPIA		
16	KANONIKH	0.552062
	...	
20	KANONIKH	0.858466
TACHYTHTA = 15 m/s, # AYTOKINHΤΩN = 10, VANET = KANONIKH KYKΛOΦOPIA		
21	KANONIKH	0.948992
	...	
25	KANONIKH	0.958413

ΤΑΧΥΤΗΤΑ = 12 m/s, # ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ = 15, VANET = ΠΥΚΝΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ		
26	ΚΑΝΟΝΙΚΗ	0.717703
...		
30	ΚΑΝΟΝΙΚΗ	0.524655
ΤΑΧΥΤΗΤΑ = 8 m/s, # ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ = 25, VANET = ΠΥΚΝΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ		
31	ΠΥΚΝΗ	0.818387
...		
35	ΠΥΚΝΗ	0.886220

Πίνακας 15: Αποτελέσματα εκτίμησης πυκνότητας κυκλοφορίας

Αναλύοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 15 κάποιος μπορεί να παρατηρήσει την ορθότητα του αλγορίθμου εκτίμησης της πυκνότητας της κυκλοφορίας. Όταν οι διαφορετικές πηγές πληροφορίας συγκλίνουν στο ίδιο συμπέρασμα, τότε καθώς περνάει ο χρόνος αυξάνει η τιμή εμπιστοσύνης της εξόδου του αλγορίθμου. Όταν τα δεδομένα εισόδου αλλάζουν σταδιακά υπάρχει ομαλή μετάβαση μεταξύ αραιής → κανονικής → πυκνής εκτίμησης κυκλοφορίας και το ανάποδο. Για παράδειγμα, στον κύκλο 25 υπάρχει 95% πιθανότητα ότι η κίνηση είναι κανονική. Στον κύκλο 26 ο αριθμός των αυτοκινήτων αυξάνει και η υποδομή ειδοποιεί ότι η κυκλοφορία τώρα είναι πυκνή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειωθεί η εμπιστοσύνη ότι η κίνηση είναι κανονική στο 52% στον κύκλο 30. Έπειτα το υποκείμενο αυτοκίνητο μειώνει ταχύτητα, η υποδομή επιμένει ότι η πυκνότητα της κυκλοφορίας είναι υψηλή και ο αριθμός των περιβαλλόντων αυτοκινήτων αυξάνεται. Η έξοδος τώρα αλλάζει από κανονική σε πυκνή κυκλοφορία και καθώς οι πηγές πληροφορίας επιμένουν και συγκλίνουν σε αυτή την εκτίμηση, η τιμή της εμπιστοσύνης αυξάνεται και φτάνει στο 89% στον κύκλο 35.

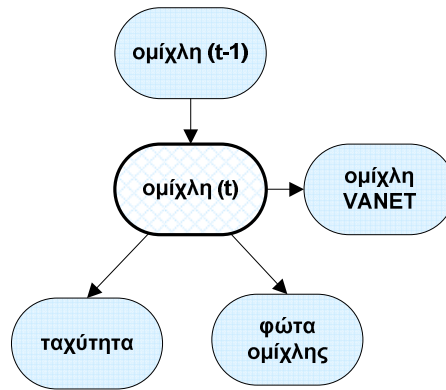
5.4.2 Ανίχνευση ομίχλης

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται αρχικά ο αλγόριθμος για την ανίχνευση της ομίχλης και ακολουθούν κάποια αποτελέσματα για τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας του. Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν από προσομοιώσεις διότι δεν ήταν δυνατόν να γίνουν μετρήσεις με πραγματικά δεδομένα λόγω έλλειψης του απαραίτητου εξοπλισμού στην πλευρά της υποδομής.

5.4.2.1 Αλγόριθμος

Η ίδια προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο υιοθετήθηκε και εδώ. Σκοπός του αλγορίθμου ανίχνευσης της ομίχλης είναι να εκτιμήσει την ύπαρξη ή όχι ομίχλης στην περιοχή γύρω από το υποκείμενο αυτοκίνητο. Ο υπολογισμός αυτός πραγματοποιείται μέσα στο υποκείμενο αυτοκίνητο με βάση πληροφορίες από τον δίαυλο CAN (ταχύτητα, φώτα ομίχλης) ενώ ταυτόχρονα

λαμβάνονται υπόψη και πληροφορίες για την πυκνότητα της ομίχλης από την υποδομή. Επίσης, επειδή η ομίχλη είναι ένα αργά μεταβαλλόμενο καιρικό φαινόμενο χρησιμοποιείται σαν είσοδος στον αλγόριθμο και η προηγούμενη εκτίμηση σχετικά με την ύπαρξη ομίχλης. Επομένως, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, και η ανίχνευση της ομίχλης βασίζεται στη μέθοδο του δυναμικού δικτύου Bayes [102,103]. Στην Εικόνα 54 φαίνεται η δομή του δικτύου Bayes που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της ομίχλης.



Εικόνα 54: Δομή δικτύου Bayes για ανίχνευση ομίχλης

Οι καταστάσεις στις οποίες μπορούν να βρεθούν οι μεταβλητές του δικτύου είναι οι ακόλουθες:

- **φώτα ομίχλης:** αναμμένα, σβηστά
- **ταχύτητα:** χαμηλή, μεσαία, υψηλή
- **ομίχλη VANET:** αραιή, μέτρια, πυκνή
- **ομίχλη (t-1, t):** ναι, όχι

Η εκτίμηση για ύπαρξη ομίχλης τη χρονική στιγμή t εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την ύπαρξη ή όχι ομίχλης τη χρονική στιγμή $t-1$, καθώς όπως είναι γνωστό η ομίχλη είναι ένα αργά μεταβαλλόμενο καιρικό φαινόμενο. Επομένως αν ανιχνεύτηκε ομίχλη την προηγούμενη χρονική στιγμή είναι πολύ πιθανό να υπάρχει ομίχλη και την τρέχουσα χρονική στιγμή. Επίσης, σημαντικές παράμετροι για την ανίχνευση της ομίχλης αποτελούν η κατάσταση των φώτων ομίχλης καθώς και οι πληροφορίες της υποδομής μέσω του VANET. Τέλος, ακόμα πιο αξιόπιστα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν χρησιμοποιώντας επιπλέον και την τιμή της ταχύτητας του αυτοκινήτου. Σε περίπτωση ομίχλης η ταχύτητα του αυτοκινήτου πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή.

Όπως έγινε και με την εκτίμηση της πυκνότητας της κυκλοφορίας και εδώ οι πίνακες της υπό συνθήκη πιθανότητας προέκυψαν έπειτα από συζητήσεις ειδικών στα πλαίσια του SAFESPOT και δεν ήταν αποτέλεσμα εκπαίδευσης.

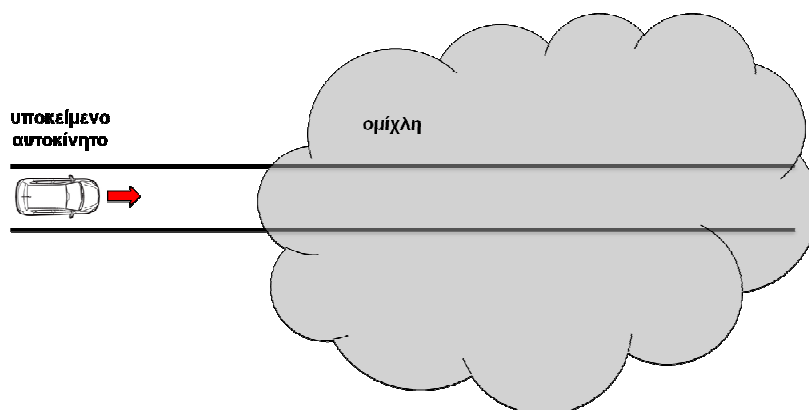
Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί πως το δίκτυο για την ανίχνευση της ομίχλης θα μπορούσε να περιλαμβάνει και άλλες μεταβλητές, όπως είναι για παράδειγμα η εξωτερική θερμοκρασία και η εποχή (άνοιξη, καλοκαίρι κλπ.). Σε αυτή την περίπτωση το δίκτυο Bayes θα γινόταν αρκετά πολύπλοκο και

μάλιστα για τον ορισμό των πινάκων πιθανότητας θα χρειαζόνταν δεδομένα, ώστε να γίνει εκπαίδευση του δικτύου, τα οποία δεν ήταν διαθέσιμα.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι με ανάλογο τρόπο μπορεί να γίνει εκτίμηση και άλλων καιρικών φαινομένων (όπως η βροχή, η ύπαρξη παγετού κλπ.). Σε αυτές τις περιπτώσεις, όπως είναι λογικό, απαιτούνται διαφορετικοί αισθητήρες εγκατεστημένοι στο αυτοκίνητο καθώς και διαφορετικά δεδομένα διαθέσιμα από την υποδομή.

5.4.2.2 Αποτελέσματα

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή αυτής της ενότητας, η έλλειψη του απαραίτητου εξοπλισμού στην πλευρά της υποδομής, ώστε να εξεταστεί ο αλγόριθμος για την ανίχνευση της ομίχλης σε πραγματικές συνθήκες, οδήγησε στην πραγματοποίηση προσομοιώσεων. Εξετάστηκαν δύο σενάρια για τον έλεγχο της ορθής λειτουργία του αλγορίθμου ανίχνευσης ομίχλης. Σύμφωνα με το πρώτο σενάριο ο οδηγός του αυτοκινήτου βρίσκεται σε περιοχή δίχως ομίχλη και κατευθύνεται σταδιακά σε περιοχή όπου επικρατεί ομίχλη. Αντίθετα, στο δεύτερο σενάριο ο οδηγός βρίσκεται σε περιοχή όπου επικρατεί ομίχλη και σταδιακά εξέρχεται από αυτή.



Εικόνα 55: Είσοδος υποκείμενου αυτοκινήτου σε περιοχή όπου επικρατεί ομίχλη

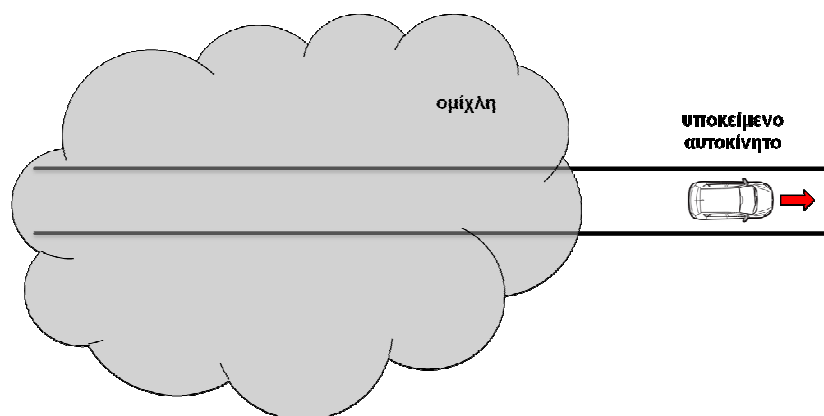
Στο πρώτο σενάριο, το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 55, το αυτοκίνητο κινείται αρχικά με ταχύτητα 25m/s, έχει τα φώτα ομίχλης κλειστά και σύμφωνα με τα μηνύματα που επέμπονται από την υποδομή δεν έχει ανιχνευτεί ομίχλη στην γύρω περιοχή. Επομένως το σύστημα από την πρώτη κιόλας επανάληψη εκτιμά πως δεν υπάρχει ομίχλη με πιθανότητα κοντά στο 98%, ενώ στην πέμπτη επανάληψη εφόσον δεν έχει αλλάξει κάτι στις πηγές πληροφορίας η πιθανότητα αυτή αγγίζει το 100%. Η χρονική διαφορά μεταξύ δύο επαναλήψεων είναι καθορισμένη στα 30 sec, καθώς η ομίχλη είναι αργά μεταβαλλόμενο φαινόμενο και δεν χρειάζεται να γίνεται επανέλεγχος πολύ συχνά. Σε εκείνο το σημείο η υποδομή στέλνει μήνυμα για ύπαρξη μέτριας ομίχλης στην περιοχή, ενώ ταυτόχρονα ο οδηγός μειώνει ταχύτητα και ανάβει τα φώτα ομίχλης καθώς έχει περιορισμένη ορατότητα. Λόγω του γεγονότος ότι μιλάμε για δυναμικό δίκτυο Bayes το

σημαντικότερο ρόλο στο αποτέλεσμα παίζει η εκτίμηση της ομίχλης την προηγούμενη χρονική στιγμή. Γι' αυτό το λόγο η ανίχνευση της ομίχλης γίνεται στην επανάληψη εφτά αντί για την επανάληψη έξι. Στην δέκατη επανάληψη το ποσοστό βεβαιότητας για την ύπαρξη ομίχλης έχει φτάσει περίπου στο 88%. Καθώς το αυτοκίνητο προχωράει η ομίχλη γίνεται εντονότερη και ο οδηγός αναγκάζεται να μειώσει περαιτέρω την ταχύτητά του. Την ίδια στιγμή έρχεται και μήνυμα από την υποδομή ότι η ομίχλη είναι πυκνή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σταδιακά να αυξηθεί το ποσοστό βεβαιότητας για ύπαρξη ομίχλης και να φτάσει κοντά στο 99%. Τα αποτελέσματα αυτά είναι συγκεντρωμένα και στον Πίνακα 16.

Αριθμός κύκλου επεξεργασίας	Ανίχνευση Ομίχλης	Εμπιστοσύνη (πιθανότητα)
TACHYTHTA = 25 m/s, ΦΩΤΑ ΟΜΙΧΛΗΣ = ΣΒΗΣΤΑ, VANET = ΑΡΑΙΗ ΟΜΙΧΛΗ		
1	ΟΧΙ	0.9798081
	...	
5	ΟΧΙ	0.999508
TACHYTHTA = 16 m/s, ΦΩΤΑ ΟΜΙΧΛΗΣ = ΑΝΑΜΜΕΝΑ, VANET = ΜΕΤΡΙΑ ΟΜΙΧΛΗ		
6	ΟΧΙ	0.730047
7	ΝΑΙ	0.642053
	...	
10	ΝΑΙ	0.884511
TACHYTHTA = 8 m/s, ΦΩΤΑ ΟΜΙΧΛΗΣ = ΑΝΑΜΜΕΝΑ, VANET = ΠΥΚΝΗ ΟΜΙΧΛΗ		
11	ΝΑΙ	0.952062
	...	
15	ΝΑΙ	0.987632

Πίνακας 16: Αποτελέσματα ανίχνευσης ομίχλης (είσοδος σε περιοχή με ομίχλη)

Αντίστοιχα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν και από το δεύτερο σενάριο κατά το οποίο το αυτοκίνητο εξέρχεται από περιοχή με ομίχλη. Το σενάριο αυτό σκιαγραφείται στην Εικόνα 56, ενώ τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 17.



Εικόνα 56: Έξοδος υποκείμενου αυτοκινήτου από περιοχή όπου επικρατεί ομίχλη

Αριθμός κύκλου επεξεργασίας	Ανίχνευση Ομίχλης	Εμπιστοσύνη (πιθανότητα)
TACHYTHTA = 8 m/s, ΦΩΤΑ ΟΜΙΧΛΗΣ = ANAMENNA, VANET = ΠΥΚΝΗ ΟΜΙΧΛΗ		
1	ΝΑΙ	0.945280
	...	
5	ΝΑΙ	0.987513
TACHYTHTA = 16 m/s, ΦΩΤΑ ΟΜΙΧΛΗΣ = ANAMMENA, VANET = ΜΕΤΡΙΑ ΟΜΙΧΛΗ		
6	ΝΑΙ	0.951663
	...	
10	ΝΑΙ	0.912398
TACHYTHTA = 25 m/s, ΦΩΤΑ ΟΜΙΧΛΗΣ = ΣΒΗΣΤΑ, VANET = ΑΡΑΙΗ ΟΜΙΧΛΗ		
11	ΟΧΙ	0.916720
	...	
15	ΟΧΙ	0.999508

Πίνακας 17: Αποτελέσματα ανίχνευσης ομίχλης (έξοδος από περιοχή με ομίχλη)

Σε αυτό το σημείο μπορεί κανείς να παρατηρήσει πως στο δεύτερο σενάριο όταν οι πηγές πληροφορίας συνέπεσαν στο ότι δεν υπάρχει ομίχλη, η εκτίμηση για την μη ύπαρξη ομίχλης άλλαξε άμεσα. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στον τρόπο κατασκευής του δικτύου, δηλαδή στους πίνακες πιθανότητας, οι οποίοι κλίνουν προς την μη ύπαρξη ομίχλης που είναι και το σύνηθες.

Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε αρχικά μια εισαγωγή στη θεωρία των δικτύων Bayes και στη συνέχεια παρουσιάστηκαν δύο συστήματα τα οποία αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού ευρωπαϊκού προγράμματος SAFESPOΤ. Τα συστήματα αυτά είχαν ως στόχο να εκτιμήσουν την πυκνότητα της κυκλοφορίας και να ανιχνεύσουν την ύπαρξη ομίχλης στην περιοχή γύρω από το υποκείμενο αυτοκίνητο. Επίσης, δόθηκαν και κάποια αποτελέσματα που επιδεικνύουν την ορθή λειτουργία των συστημάτων αυτών. Ο έλεγχος της ορθής λειτουργίας έγινε με δεδομένα από προσομοιώσεις καθώς από τη μία δεν υπήρχαν αρκετά εξοπλισμένα αυτοκίνητα, ενώ από την άλλη δεν υπήρχαν και οι κατάλληλοι αισθητήρες στην υποδομή.

Παρόλα αυτά, τα δίκτυα Bayes μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μία πλειάδα εφαρμογών στα ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων και να βοηθήσουν και στη λήψη αποφάσεων. Ειδικότερα, τα δίκτυα Bayes αποτελούν μία από τις περισσότερο χρησιμοποιούμενες προσεγγίσεις για σύντηξη δεδομένων υψηλού επιπέδου.

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μια πρώτη προσπάθεια ανάπτυξης αλγορίθμων σύντηξης υψηλού επιπέδου με χρήση αυτής της θεωρίας. Μελλοντικός στόχος είναι η περαιτέρω εμβάθυνση και διερεύνηση των

δικτύων Bayes και η μελέτη τεχνικών εκπαίδευσης, ώστε όχι μόνο να επεκταθεί η γνώση του συγγραφέα πάνω στο συγκεκριμένο θέμα αλλά και να ενισχυθεί η τεχνογνωσία στα πλαίσια της ομάδας I-SENSE.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά σχολιάζονται τα αποτελέσματα των προηγούμενων κεφαλαίων και εξάγονται πολύτιμα συμπεράσματα. Στην συνέχεια γίνονται κάποιες προτάσεις από τον συγγραφέα για μελλοντική έρευνα στον τομέα, με βάση και την εμπειρία που αποκτήθηκε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής.

6.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Στο πρώτο κεφάλαιο έγινε μια εισαγωγή στις τεχνικές σύντηξης δεδομένων και στα ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων που βρίσκονται στο επίκεντρο των ευφυών συστημάτων μεταφοράς, τόσο από τεχνολογικής άποψης όσο και ως προς το πεδίο εφαρμογών. Αρχικά έγινε αναφορά στο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο σύντηξης δεδομένων καθώς και στις διάφορες αρχιτεκτονικές σύντηξης. Στη συνέχεια αναλύθηκαν τα ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων και τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους. Επίσης, παρουσιάστηκαν κάποιες βασικές έννοιες και όροι που χρησιμοποιήθηκαν σε όλη την έκταση της διατριβής.

Το σημαντικότερο πρόβλημα στα ευφυή συστήματα μεταφοράς είναι η αντίληψη από τον οδηγό των συνθηκών που επικρατούν στο οδικό περιβάλλον με απώτερο στόχο την μείωση των τροχαίων ατυχημάτων. Η χρήση αισθητήρων στο αυτοκίνητο, όπως ραντάρ και κάμερες, και η επεξεργασία των δεδομένων τους βοηθάει τον οδηγό στην αντίληψη του οδικού περιβάλλοντος αλλά δεν είναι αρκετή. Για να επεκταθεί ακόμα περισσότερο ο ορίζοντας αντίληψης του οδηγού πρέπει να προαχθεί η χρήση ασύρματης δικτύωσης μεταξύ αυτοκινήτων. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζονται αυτο-οργανούμενα δίκτυα αυτοκινήτων που ανταλλάσσουν ποικίλες πληροφορίες μεταξύ τους και επομένως μπορούν να ενημερώνονται για γεγονότα ακόμα και μερικές εκατοντάδες μέτρα ή ακόμα και μερικά χιλιόμετρα μακριά. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στη σύντηξη των δεδομένων που προέρχονται από τις διάφορες πηγές, καθώς τα δεδομένα αυτά θα πρέπει να είναι συγχρονισμένα προτού γίνει περαιτέρω επεξεργασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η αρχιτεκτονική αναφοράς του κάθε κόμβου του ασύρματου δικτύου των αυτοκινήτων και αναλύθηκαν τα βασικά τμήματά της. Η αρχιτεκτονική αυτή σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τις δραστηριότητες προτυποποίησης που εκτυλίσσονται στην Ευρώπη. Κεντρικά στοιχεία αυτής της αρχιτεκτονικής είναι ο τοπικός δυναμικός χάρτης και το σύστημα σύντηξης δεδομένων.

Ο τοπικός δυναμικός χάρτης είναι μια σχεσιακή βάση δεδομένων με διαστρωματωμένη αρχιτεκτονική, όπου οι διαφορετικές πληροφορίες βρίσκονται σε διαφορετικά στρώματα, και έχει ως στόχο

την αναπαράσταση του οδικού περιβάλλοντος με τρόπο εύχρηστο για τις εφαρμογές. Το σύστημα σύντηξης δεδομένων αποτελεί τη βασική είσοδο στον τοπικό δυναμικό χάρτη και σκοπός του είναι ο συνδυασμός των πληροφοριών από διαφορετικές πηγές (αισθητήρες αυτοκινήτου, ασύρματα μηνύματα από άλλα αυτοκίνητα και σταθμούς βάσης κλπ.) με αξιόπιστο τρόπο, ώστε να παράγει τις πιο ενημερωμένες και έγκυρες πληροφορίες για τα άλλα αυτοκίνητα καθώς και για τις μελλοντικές προθέσεις τους.

Τέλος, στο κεφάλαιο αυτό έγινε μια κατηγοριοποίηση των εφαρμογών στα ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων σε εφαρμογές σχετιζόμενες με την ασφάλεια, την αποδοτικότητα της κυκλοφορίας και την ψυχαγωγία και δόθηκαν και κάποια παραδείγματα από κάθε κατηγορία. Στην παρούσα εργασία το ενδιαφέρον εστιάστηκε στις εφαρμογές ασφάλειας.

Στο *τρίτο κεφάλαιο* αρχικά έγινε μια συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων κίνησης που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και των τεχνικών φιλτραρίσματος που στηρίζονται στον αλγόριθμο του Kalman. Στη συνέχεια έγινε μια μικρή εισαγωγή στα ασαφή συστήματα και ειδικά στο Sugeno σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή του μοντέλου κίνησης στο τροποποιημένο φίλτρο που προτάθηκε σε αυτό το κεφάλαιο.

Το προτεινόμενο φίλτρο που παρουσιάστηκε λαμβάνει υπόψη την καμπυλότητα του δρόμου, τη γωνιακή ταχύτητα και την επιτάχυνση του αυτοκινήτου για τη μοντελοποίηση της κίνησής του με πιο ρεαλιστικό τρόπο. Το φίλτρο αυτό αποδείχθηκε ανώτερο σε επίδοση τόσο από το εκτεταμένο Kalman όσο και από το απλό Unscented Kalman το οποίο χρησιμοποιεί ένα μόνο προκαθορισμένο μοντέλο κίνησης. Το πλεονέκτημα του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι ότι εκμεταλλεύεται τα δεδομένα από τους ψηφιακούς χάρτες και τις πληροφορίες που αφορούν τη δυναμική κατάσταση του αυτοκινήτου ώστε να επιλέξει τα καταλληλότερα μοντέλα κίνησης και να τα συνδυάσει με τελικό στόχο τη μείωση των σφαλμάτων του φιλτραρίσματος.

Στο *τέταρτο κεφάλαιο* παρουσιάστηκε μια νέα μέθοδος για τον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς του υποκείμενου αυτοκινήτου και των υπόλοιπων αυτοκινήτων. Η μέθοδος αυτή λαμβάνει υπόψη και τα στοιχεία που προέρχονται από τα άλλα αυτοκίνητα μέσω της ασύρματης επικοινωνίας.

Στην εργασία αυτή τονίστηκε η σημασία της χρήσης των μηνυμάτων του VANET για την παροχή βοήθειας σε ένα αυτοκίνητο ώστε να αντιλαμβάνεται καλύτερα το οδικό περιβάλλον. Πρώτα απ' όλα, η ανάγκη για το έργο αυτό προήλθε από το γεγονός ότι η εκτίμηση της δυναμικής κατάστασης των άλλων αυτοκινήτων που στηρίζεται μόνο σε αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι στο υποκείμενο αυτοκίνητο και σε προηγμένες τεχνικές φιλτραρίσματος και ιχνηλασίας δεν είναι αρκτική. Η εκτίμηση των τιμών της ταχύτητας, της γωνιακής ταχύτητας, της επιτάχυνσης και της κατεύθυνσης από απομακρυσμένες και θορυβώδεις μετρήσεις εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των διαθέσιμων αισθητήρων και αποτελεί ένα σχετικά δύσκολο έργο. Ωστόσο, κατά τη διαβίβαση αυτών των τιμών μέσω ασύρματων μηνυμάτων, παρουσιάζεται σημαντική βελτίωση και η εκτίμηση της μελλοντικής τροχιάς είναι πολύ καλύτερη από ότι χωρίς τη χρήση VANET. Ουσιαστική προς αυτή την κατεύθυνση είναι επίσης η χρήση των ψηφιακών χαρτών και του αισθητήρα GPS. Χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες, ειδικά την καμπυλότητα του δρόμου στη θέση που κινείται το αυτοκίνητο, μπορούν να επιτευχθούν ακόμα καλύτερα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, αν το αυτοκίνητο κινείται σε καμπύλο δρόμο τότε ένα καμπυλόγραμμο μοντέλο κίνησης, όπως το CTR ή το CTRA, θα επιλεγεί για τον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς.

Τα αποτελέσματα που αφορούν την μελλοντική τροχιά του υποκείμενου αυτοκινήτου έδειξαν ότι η απόδοση του αλγορίθμου, όταν χρησιμοποιήθηκε η έξοδος του συστήματος συλλογιστικής Dempster-Shafer, ήταν καλύτερη από την απόδοση του καθενός από τα τέσσερα αυτόνομα μοντέλα κίνησης που χρησιμοποιήθηκαν. Η ακρίβεια που επιτεύχθηκε, στην περίπτωση της μελλοντικής τροχιάς των 4 δευτερολέπτων, ήταν μικρότερη από 50 cm και η τυπική απόκλιση ήταν επίσης αρκετά μικρή. Επομένως, ο αλγόριθμος αυτός είναι κατάλληλος για κρίσιμες καταστάσεις που αφορούν την οδική ασφάλεια όπου η γνώση της ακριβούς θέσης του αυτοκινήτου είναι απαραίτητη σε ένα διακριτό χρονικό ορίζοντα. Το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η εκτίμηση της μελλοντικής τροχιάς είναι αξιόπιστη είναι περίπου 3 με 4 δευτερόλεπτα. Η κίνηση ενός αυτοκινήτου στο δρόμο είναι εξαιρετικά δυναμική διαδικασία, ειδικά αν εκτελεί ελιγμούς, οπότε η εκτίμηση της τροχιάς δεν είναι αξιόπιστη μετά από λίγα δευτερόλεπτα.

Η εκμετάλλευση του ασύρματου δικτύου πρόσθεσε ένα επιπλέον όφελος στον υπολογισμό της μελλοντικής τροχιάς των άλλων αυτοκινήτων, καθώς σε προηγούμενες προσεγγίσεις χρειαζόταν ιδιαίτερη προσοχή λόγω των φυσικών περιορισμών και των χαρακτηριστικών του εκάστοτε αισθητήρα, π.χ. κακή εκτίμηση των πλευρικών ιδιοτήτων των αντικειμένων από το ραντάρ. Τα αποτελέσματα από την προσαρμογή και τη δοκιμή του προτεινόμενου αλγορίθμου στην εφαρμογή EEBL επαλήθευσαν εκ νέου το όφελος από την εκμετάλλευση της μελλοντικής τροχιάς στις εφαρμογές ασφάλειας των αυτοκινήτων.

Συμπερασματικά, τα συνολικά αποτελέσματα έδειξαν την πολύ καλή απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου, γεγονός που τονίζει τη σημασία της χρήσης ασύρματων μηνυμάτων στο οδικό περιβάλλον. Ο συνεργατικός αλγόριθμος υπολογισμού της μελλοντικής τροχιάς που παρουσιάστηκε σε αυτό το κεφάλαιο θα δώσει τη δυνατότητα για την πραγματοποίηση και άλλων προηγμένων εφαρμογών ασφάλειας, όπως είναι η συνεργατική προειδοποίηση σύγκρουσης και ο συνεργατικός προσαρμοστικός έλεγχος πλοήγησης.

Τέλος στο *πέμπτο κεφάλαιο* έγινε αρχικά μια εισαγωγή στη θεωρία των δικτύων Bayes και στη συνέχεια παρουσιάστηκαν δύο συστήματα τα οποία αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού ευρωπαϊκού προγράμματος SAFESPOT. Τα συστήματα αυτά είχαν ως στόχο να εκτιμήσουν την πυκνότητα της κυκλοφορίας και να ανιχνεύσουν την ύπαρξη ομίχλης στην περιοχή γύρω από το υποκείμενο αυτοκίνητο. Επίσης, δόθηκαν και κάποια αποτελέσματα που απέδειξαν την ορθή λειτουργία των συστημάτων αυτών. Ο έλεγχος της ορθής λειτουργίας έγινε με δεδομένα από προσομοιώσεις καθώς δεν υπήρχαν αρκετά εξοπλισμένα αυτοκίνητα από τη μία ενώ δεν υπήρχαν και οι κατάλληλοι αισθητήρες στην υποδομή από την άλλη.

Παρόλα αυτά, τα δίκτυα Bayes μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μία πλειάδα εφαρμογών στα ασύρματα δίκτυα αυτοκινήτων και να βοηθήσουν και στη λήψη αποφάσεων. Ειδικότερα, τα δίκτυα Bayes αποτελούν μία από τις περισσότερες χρησιμοποιούμενες προσεγγίσεις για σύντηξη δεδομένων υψηλού επιπέδου. Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μια πρώτη προσπάθεια ανάπτυξης αλγορίθμων σύντηξης υψηλού επιπέδου με χρήση αυτής της θεωρίας από το συγγραφέα. Μελλοντικός στόχος είναι η περαιτέρω εμβάθυνση και διερεύνηση των δικτύων Bayes και η μελέτη τεχνικών εκπαίδευσης, ώστε όχι μόνο να επεκταθεί η γνώση του συγγραφέα πάνω στο συγκεκριμένο θέμα αλλά και να ενισχυθεί η τεχνογνωσία στα πλαίσια της ομάδας I-SENSE. Περισσότερες λεπτομέρειες και προτάσεις για μελλοντική έρευνα δίνονται στην παράγραφο που ακολουθεί.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα διατριβή αποτελεί μια απλή συνεισφορά στον επιστημονικό χώρο των Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών. Σίγουρα όμως, δίνει τροφή για την περαιτέρω ενασχόληση, τόσο του συγγραφέα, όσο και άλλων πιθανών ερευνητών, με μια σειρά θεμάτων που χρήζουν βελτίωσης ή περαιτέρω έρευνας. Τα βασικά αυτά σημεία, όπως εντοπίζονται από τον συγγραφέα, είναι τα ακόλουθα:

- Υπάρχει ανάγκη για περισσότερη έρευνα και μελέτη πάνω στα αυτο-οργανούμενα δίκτυα αυτοκινήτων και στα θέματα που προκύπτουν λόγω της χρήσης του ασύρματου διαύλου επικοινωνίας. Υπάρχει μια πληθώρα πεδίων έρευνας που αφορούν τα δίκτυα αυτοκινήτων και κάποια παραδείγματα δίνονται στη συνέχεια: προστασία του δικτύου από κακόβουλες ενέργειες, καθορισμός αρχιτεκτονικής και προτύπων επικοινωνίας, αποτελεσματικά πρωτόκολλα δρομολόγησης, επίλυση προβλημάτων διάδοσης, βελτίωση ποιότητας διαύλου επικοινωνίας, αποτελεσματική χρήση εύρους ζώνης, συγχρονισμός και σύντηξη των δεδομένων από τα διάφορα αυτοκίνητα. Τα παραπάνω παραδείγματα είναι ενδεικτικά της ερευνητικής δραστηριότητας στον τομέα αλλά δεν περιορίζονται μόνο σε αυτά.
- Χρειάζεται περισσότερη μελέτη της θεωρίας γύρω από τα δίκτυα Bayes για την ανάπτυξη πιο προηγμένων εφαρμογών. Επίσης, πρέπει να μελετηθούν οι αλγόριθμοι εκπαίδευσης των δικτύων αυτών, τόσο της δομής όσο και των παραμέτρων τους, ώστε να κατασκευαστεί με απλό τρόπο το ζητούμενο δίκτυο στην περίπτωση που είναι διαθέσιμα δεδομένα εκπαίδευσης. Επιπλέον, η μελέτη των διαγραμμάτων επιρροής (influence diagrams), τα οποία αποτελούν μια επέκταση των δικτύων Bayes, μπορούν να βοηθήσουν σημαντικά στη λήψη αποφάσεων σε μία εφαρμογή.
- Για το φιλτράρισμα των δεδομένων των αυτοκινήτων και την εξαγωγή της μελλοντικής τροχιάς τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον ακόμα πιο ρεαλιστικά μοντέλα κίνησης, όπως είναι το μοντέλο του ποδηλάτου (bicycle model). Η δυσκολία σε αυτό το κομμάτι είναι ότι αυξάνει η πολυπλοκότητα και οι υπολογιστικές απαιτήσεις του υπό ανάπτυξη συστήματος. Επίσης, μπορούν να μελετηθούν και διαφορετικοί αλγόριθμοι συνδυασμού ή επιλογής του κατάλληλου μοντέλου κίνησης ανάλογα με την κατάσταση.
- Σαν επέκταση του αλγορίθμου υπολογισμού της μελλοντικής τροχιάς θα μπορούσε να αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος σχεδιασμού της πορείας (path planning) του υποκείμενου αυτοκινήτου, ο οποίος να βασίζεται στην ενισχυμένη αντίληψη του οδικού περιβάλλοντος, με τη χρήση κατάλληλων αισθητήρων, ασύρματης επικοινωνίας καθώς και προηγμένων ψηφιακών χαρτών. Η μοντελοποίηση αυτού του μονοπατιού μπορεί να βασιστεί στη θεωρία των splines (π.χ. Non-Uniform Relational B Splines – NURBS) και να εκμεταλλευτεί πιθανότατα κάποια τροποποίηση των αλγορίθμων των διαγραμμάτων Voronoi για τον υπολογισμό της ασφαλέστερης διαδρομής ανάμεσα σε άλλα κινούμενα αυτοκίνητα ή εμπόδια στο οδικό περιβάλλον.
- Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ενσωματωμένα συστήματα (embedded systems) και η αυτοματοποιημένη οδήγηση (automated driving) για τα μελλοντικά αυτοκίνητα, καθώς η δημιουργία

πιο αξιόπιστων, περιορισμένου μεγέθους, υπολογιστικά εφικτών και οικονομικά προσιτών συστημάτων αποτελεί μια πρόκληση. Το ενδιαφέρον αυτό προς το παρόν περιορίζεται μόνο σε ερευνητικό επίπεδο, καθώς υπάρχουν μία σειρά από ρυθμιστικά-κανονιστικά θέματα (απουσία νομοθεσίας, ηθικά θέματα, ασφαλιστικές εταιρείες, απόδοση ευθύνης σε περίπτωση σύγκρουσης όταν το αυτοκίνητο κινείται μόνο του κλπ.) τα οποία εμποδίζουν την εφαρμογή τέτοιων συστημάτων στην αγορά.

- Πολύ σημαντική είναι και η εκμετάλλευση όσο το δυνατόν περισσότερων πληροφοριών που διατίθενται από προηγμένους ψηφιακούς χάρτες όπως π.χ. η γεωμετρία των λωρίδων του δρόμου, τα σήματα του Κ.Ο.Κ., κάποια σημεία ενδιαφέροντος, σημεία στάθμευσης κλπ. Η χρησιμοποίηση των χαρτών θα βοηθήσει στην ανάπτυξη σημαντικών εφαρμογών και μαζί με την ασύρματη επικοινωνία μπορούν να αποτελέσουν τους “εικονικούς” αισθητήρες οι οποίοι θα συμπληρώσουν τους πραγματικούς αισθητήρες του αυτοκινήτου και θα συνεισφέρουν στην ακόμα καλύτερη αντίληψη του οδικού περιβάλλοντος και κατ’ επέκταση στη μείωση των τροχαίων ατυχημάτων.

Η ανάπτυξη των Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών έχει κάνει άλματα την τελευταία δεκαετία. Η χρήση της ασύρματης επικοινωνίας στα συστήματα αυτά αποτελεί τον κυριότερο κομμάτι έρευνας στον τομέα των μεταφορών και σύμφωνα με τις εκτιμήσεις των ειδικών σε ολόκληρο τον κόσμο η δικτύωση των αυτοκινήτων και της υποδομής θα οδηγήσει στα επόμενης γενιάς Ευφυή Συστήματα Μεταφοράς. Η ανάπτυξη μιας ευρείας κλίμακας εφαρμογών που σχετίζονται με την ασφάλεια, την αποδοτικότητα ή ακόμα και την ψυχαγωγία σε οδικά περιβάλλοντα είναι σχεδόν βέβαιη στο εγγύς μέλλον. Υπάρχουν διάφορα εμπόδια, τεχνολογικά και μη, στην πορεία εφαρμογής των ασύρματων τεχνολογιών σε οδικό περιβάλλον, όμως η διαρκής προσπάθεια βελτίωσης αποτελεί θεμέλιο λίθο για την εξέλιξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Με αυτό το πνεύμα πορεύτηκε και ο συγγραφέας κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ I-SENSE

Το ερευνητικό αυτοκίνητο της ομάδας I-SENSE που υπάγεται στο εργαστήριο Μικροκυμάτων και Οπτικών Ινών (EMOI) της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ φαίνεται στην Εικόνα 57. Πρόκειται για ένα FIAT Stilo μοντέλο του 2004 και κυβισμού 1200cc. Κάποιες σημαντικές πληροφορίες που αφορούν τις διαστάσεις του ίδιου του αυτοκινήτου αλλά και κάποιων άλλων συστατικών μερών του, όπως είναι η ρόδα, είναι οι ακόλουθες:

- | | | | |
|-------------------|---------|-----------------|---------|
| • Μήκος: | 4.253 m | • Πλάτος ρόδας: | 0.195 m |
| • Πλάτος: | 1.756 m | • Ακτίνα ρόδας: | 0.30 m |
| • Μεταττόχο πίσω: | 1.70 m | • Μεταξόνιο: | 2.55 m |



Εικόνα 57: Ερευνητικό αυτοκίνητο I-SENSE

Το συγκεκριμένο αυτοκίνητο είναι εξοπλισμένο με μια πληθώρα από αισθητήρες και υπολογιστικά συστήματα τα οποία αναφέρονται πιο αναλυτικά στη συνέχεια. Οι πληροφορίες που συλλέγονται από τους αισθητήρες αυτούς χρησιμεύουν για την ανάπτυξη των αλγορίθμων σύντηξης (π.χ. ιχνηλασία, υπολογισμός μελλοντικής τροχιάς, ανίχνευση ελιγμού κλπ.) που είναι και ο λόγος ύπαρξης του συγκεκριμένου αυτοκινήτου. Τελικός στόχος είναι μέσα από τους αλγορίθμους αυτούς να επιτευχθεί η αντίληψη του οδικού περιβάλλοντος και επομένως η υποβοήθηση των εφαρμογών ενεργητικής ασφάλειας.

Λίστα αισθητήρων

Οι αισθητήρες οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στο ερευνητικό αυτοκίνητο και χρησιμεύουν για τον εντοπισμό άλλων αυτοκινήτων και αντικειμένων στο οδικό περιβάλλον είναι οι ακόλουθοι:

- 4 USB κάμερες (Εικόνα 58)
- 1 Firewire κάμερα (Εικόνα 58γ)
- 1 ραντάρ μεγάλης εμβέλειας ($R^9 = 150\text{m}$, $\text{FOV}^{10} = 12^\circ$) (Εικόνα 59α)
- 1 σαρωτής λέιζερ ($R = 100\text{m}$, $\text{FOV}^{11} = 360^\circ/180^\circ$) (Εικόνα 59β)
- 2 ραντάρ μεσαίας εμβέλειας ($R = 70\text{m}$, $\text{FOV} = 80^\circ$) (Εικόνα 59γ)
- 1 αισθητήρας γωνιακής ταχύτητας (yaw rate)
- 1 uBlox GPS δέκτης
- 1 επιταχυνσιόμετρο (accelerometer)
- 1 DGPS δέκτης και κεραία (Εικόνα 60)
- 1 κεραία ασυρμάτου δικτύου



α) USB κάμερες στους εμπρόσθιους καθρέφτες



β) Οπίσθια USB κάμερα



γ) Εμπρόσθιες USB & Firewire κάμερες

Εικόνα 58: USB κάμερες & Firewire κάμερα

⁹Το R βγαίνει από το “Range” και συμβολίζει την εμβέλεια του αισθητήρα.

¹⁰ Το FOV είναι συντομογραφία του “Field-Of-View” και αντιπροσωπεύει τη γωνία μέτρησης του αισθητήρα.

¹¹ Η έκφραση $360^\circ/180^\circ$ σημαίνει πως η γωνία μέτρησης του σαρωτή λέιζερ είναι 360° αλλά περιορίζεται από τον οπίσθιο προφυλακτήρα του αυτοκινήτου περίπου στις 180° .



α) Ραντάρ μεγάλης εμβέλειας



β) Σαρωτής λέιζερ



γ) Ραντάρ μεσαίας εμβέλειας



Εικόνα 59: Αισθητήρες αντίληψης οδικού περιβάλλοντος



Εικόνα 60: Η κεραία του διαφορικού GPS (DGPS)

Λοιπός εξοπλισμός

Ο υπόλοιπος εξοπλισμός (μερικώς φαίνεται στην Εικόνα 61), μαζί με τα χρησιμοποιούμενα υπολογιστικά συστήματα είναι ο εξής:

- 1 TFT οθόνη 17"
- 1 xPC, υπολογιστής για αυτοκίνητα ο οποίος εκτελεί μοντέλα Simulink
- 1 eBox, υπολογιστής για αυτοκίνητα (automotive PC)
- 1 Matrox , υπολογιστής για αυτοκίνητα για επεξεργασία εικόνας (image processing)
- 1 NAVTEQ Sensor Box + ADAS-RP license, υπολογιστής παροχής ηλεκτρονικού ορίζοντα
- 1 CANcase, διεπαφή CAN bus σε σειριακή
- 1 PDA
- Αναλογικός/ψηφιακός μετατροπέας σε CAN (A/D to CAN) και μετατροπέας από σειριακή σε CAN (SERIAL to CAN)

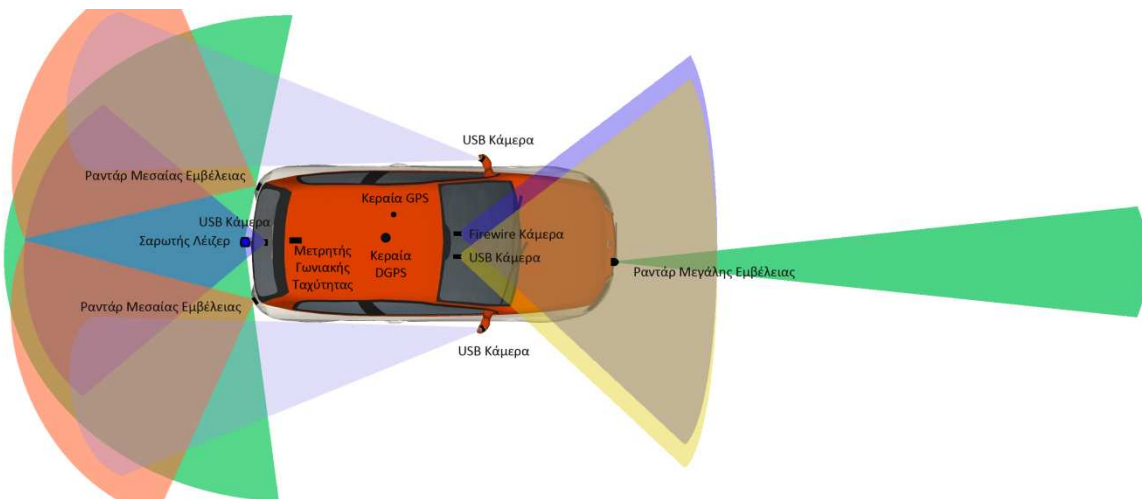


Εικόνα 61: Υπολογιστικές μονάδες εντός του αυτοκινήτου

Επιπλέον έχει αναπτυχθεί σύστημα εξωτερικής τροφοδοσίας το οποίο επιτρέπει την παροχή ρεύματος και συνεπώς τη δοιμή και επεξεργασία των αισθητήρων και τον υπολογιστικών συστημάτων του αυτοκινήτου χωρίς να χρειάζεται να δουλεύει η μηχανή του. Επομένως το αυτοκίνητο μπαίνει κυριολεκτικά στην «πρίζα» και μέσω ενός μετατροπέα (inverter) καθώς και κατάλληλων ασφαλειών και ρυθμιστών τάσης τροφοδοτούνται όλα του τα συστήματα με την απαιτούμενη τάση.

Τοπολογία αισθητήρων

Εκτός από τη λίστα με τους αισθητήρες και τα υπολογιστικά συστήματα που είναι διαθέσιμα στο ερευνητικό αυτοκίνητο, καθοριστικό ρόλο παίζει και η θέση στην οποία βρίσκονται εγκατεστημένα. Η πλειονότητα των υπολογιστικών μονάδων είναι τοποθετημένες στο χώρο των αποσκευών, όπως φαίνεται και από την προηγούμενη εικόνα, ενώ η τοπολογία των διαθέσιμων αισθητήρων μαζί με την εμβέλειά τους φαίνεται στην Εικόνα 62.



Εικόνα 62: Τοπολογία των αισθητήρων του ερευνητικού αυτοκινήτου

Επιπλέον, στον Πίνακα 18 φαίνεται σε γενικές γραμμές που βρίσκεται ο εκάστοτε αισθητήρας, αν είναι δηλαδή τοποθετημένος στο εμπρός, στο πίσω, στο δεξί ή στο αριστερό μέρος του αυτοκινήτου, στην οροφή ή εντός του αυτοκινήτου.

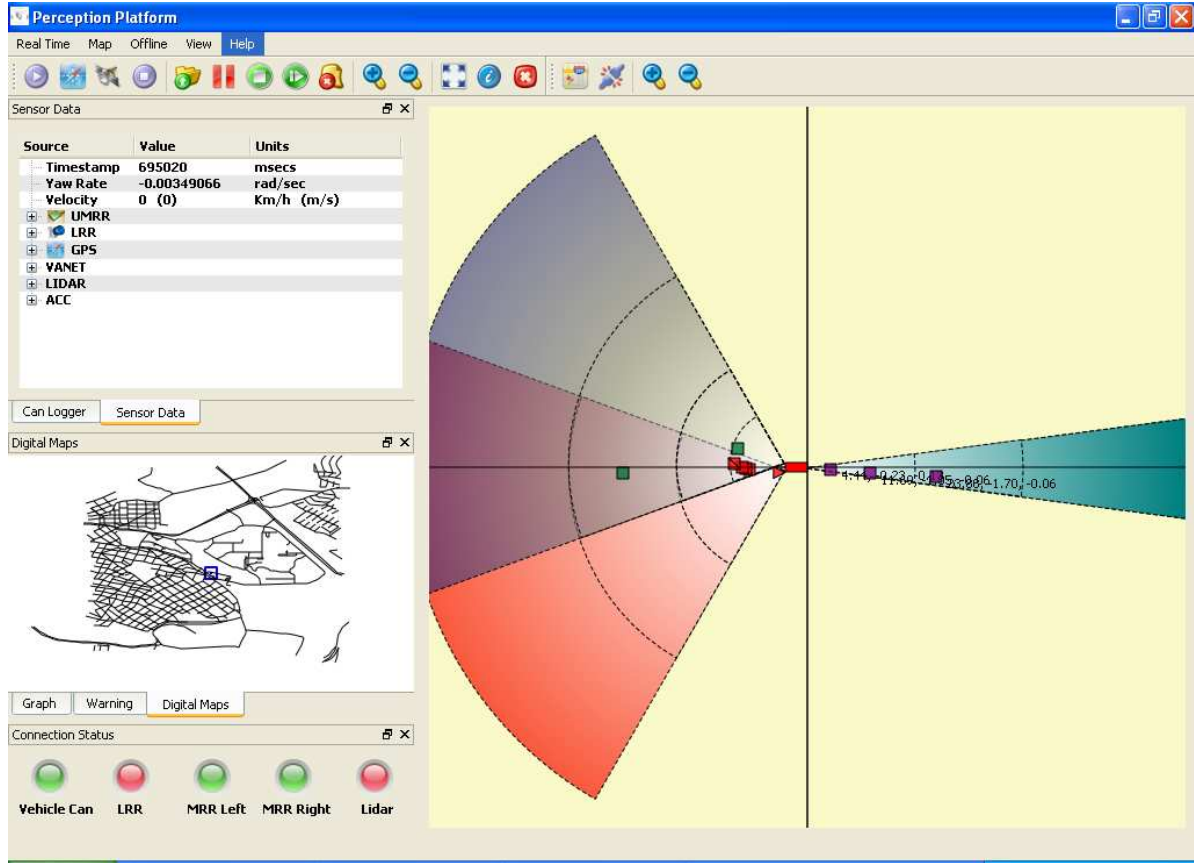
Αισθητήρας	Θέση
4 USB κάμερες	δεξιά, αριστερά, μπροστά, πίσω
1 firewire κάμερα	μπροστά
1 σαρωτής λέιζερ	πίσω
1 ραντάρ μεγάλης εμβέλειας	μπροστά
2 ραντάρ μεσαίας εμβέλειας	πίσω
1 αισθητήρας γωνιακής ταχύτητας	εντός
1 GPS κεραία	οροφή
1 επιταχυνσιόμετρο	εντός
1 DGPS κεραία και δέκτης	οροφή
1 ublox GPS δέκτης	οροφή
1 κεραία ασύρματου δικτύου	οροφή

Πίνακας 18: Θέση αισθητήρων στο ερευνητικό αυτοκίνητο

Πλατφόρμα

Στα πλαίσια της ερευνητικής δραστηριότητας της ομάδας I-SENSE έχει αναπτυχθεί και μία πλατφόρμα, για συλλογή και επεξεργασία δεδομένων από τις διάφορες πηγές πληροφορίας, η οποία

λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο (real-time). Στην πλατφόρμα αυτή, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 63, μπορούν να απεικονίζονται οι μετρήσεις από τους αισθητήρες, τα αποτελέσματα της ιχνηλασίας, η μελλοντική τροχιά των αυτοκινήτων, οι χάρτες κλπ.



Εικόνα 63: Πλατφόρμα αυτοκινήτου

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΒΟΗΘΗΤΙΚΟ Ι.Χ. ΓΙΑ ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Για την διεξαγωγή των μετρήσεων που περιείχαν ασύρματη επικοινωνία μεταξύ αυτοκινήτων χρησιμοποιήθηκε ένα βοηθητικό Ι.Χ. αυτοκίνητο (Toyota Yaris) το οποίο εξοπλίστηκε κατάλληλα για τις απαιτήσεις των μετρήσεων. Το αυτοκίνητο αυτό φαίνεται στην Εικόνα 64 και αναλυτικά ο εξοπλισμός του αναφέρεται στην επόμενη παράγραφο.



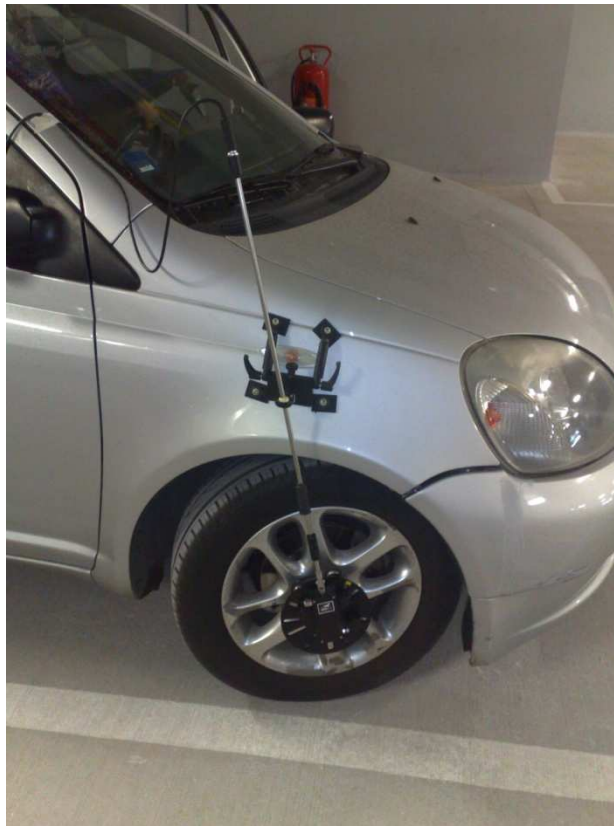
Εικόνα 64: Βοηθητικό Ι.Χ. αυτοκίνητο

Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός του βοηθητικού ερευνητικού αυτοκινήτου (αισθητήρες και υπολογιστικές μονάδες) είναι ο ακόλουθος:

- 1 αισθητήρας μέτρησης ταχύτητας (Εικόνα 65)
- 1 απλό USB GPS (Εικόνα 66)
- 1 DGPS δέκτης
- 1 αισθητήρας μέτρησης της γωνιακής ταχύτητας και της επιτάχυνσης (Εικόνα 67)

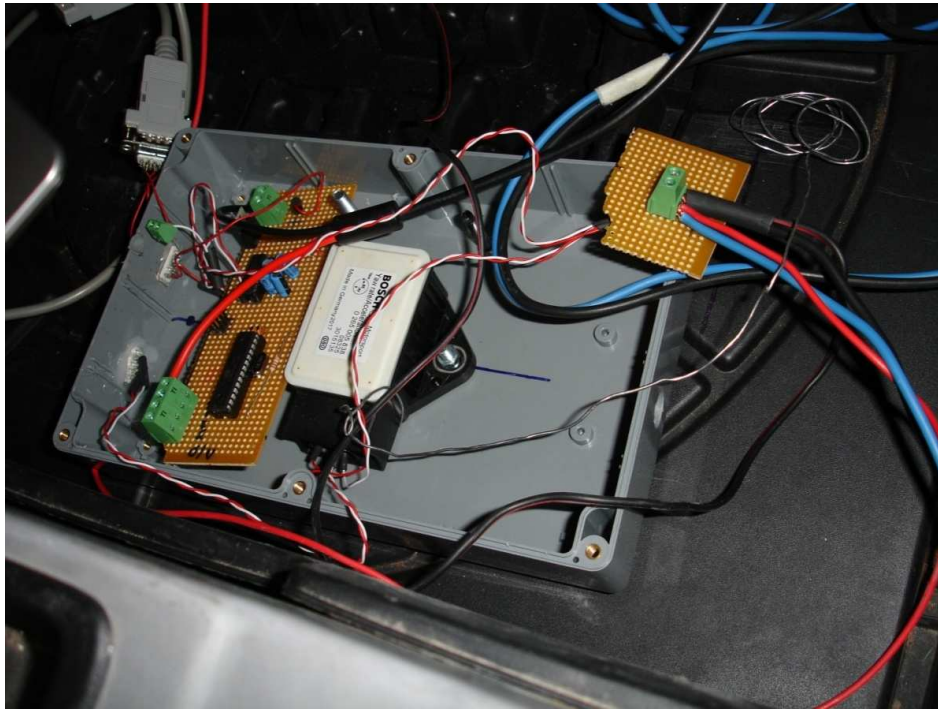
- 1 κεραία ασυρμάτου δικτύου (Εικόνα 66)
- 1 φορητός υπολογιστής



Εικόνα 65: Αισθητήρας μέτρησης ταχύτητας



Εικόνα 66: Απλό USB GPS και κεραία ασυρμάτου δικτύου



Εικόνα 67: Αισθητήρας μέτρησης γωνιακής ταχύτητας και επιτάχυνσης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] D. Hall & J. Llinas, *Handbook of Multisensor Data Fusion*, CRC press LLC, ISBN 0-8493-2379-7, United States of America, 2001.
- [2] A. Polychronopoulos, A. Amditis, U. Scheunert & T. Tatschke, Revisiting JDL model for automotive safety applications: the PF2 functional model, *Proceedings of 9th International Conference on Information Fusion*, ISBN 0-9721844-6-5, Florence, Italy, July 2006.
- [3] S. Blackman & R. Popoli, *Design and Analysis of Modern Tracking Systems*, Artech House, ISBN 1-58053-006-0, United States of America, 1999.
- [4] Y. Bar-Shalom & X. R. Li, *Estimation and Tracking: Principles, Techniques, and Software*, Artech House, Norwood, 1993.
- [5] N. Floudas, P. Lytrivis, A. Polychronopoulos & A. Amditis, On the track-to-track association problem in road environments, *Proceedings of 10th International Conference on Information Fusion*, ISBN 978-0-662-45804-3, Québec, Canada, July 2007.
- [6] N. Floudas, P. Lytrivis, H. Avgoustidis, M. Ahrholdt, G. Thomaidis & A. Amditis, Track Based Multi Sensor Data Fusion for Collision Mitigation, *Proceedings of 11th International Conference on Information Fusion*, Cologne, Germany, July 2008.
- [7] S. Deb, M. Yeddanapudi, K. Pattipati, & Y. Bar-Shalom, A Generalized S-D Assignment Algorithm for Multisensor-Multitarget State Estimation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 33, No. 2, April 1997, pp. 523-538, ISSN 0018-9251.
- [8] R. A. Singer & A. T. Kanyuck, Computer control of multiple site track correlation, *Automatica*, Vol. 7, No. 3, pp. 455—463, 1971.
- [9] Y. Bar-Shalom, On the track-to-track correlation problem, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 26, No. 2, April 1981, pp. 571-572, ISSN 0018-9286.
- [10] J. Uhlmann, Dynamic map building and localization: new theoretical foundations, Ph.D. Thesis, University of Oxford, 1995.
- [11] J. Uhlmann, Covariance Consistency Methods for Fault-Tolerant Distributed Data Fusion, *Elsevier Information Fusion*, Vol. 4, No. 3, September 2003, pp. 201-215.
- [12] R. Lamm, B. Psarianos & T. Mailaender, *Highway design and traffic safety engineering handbook*, McGraw-Hill, ISBN 978-0070382954, New York, 1999.
- [13] L. Piegl & W. Tiller, *The NURBS Book (second edition)*, Springer, ISBN 978-3540615453, Germany, 1996.
- [14] M. Tsogas, P. Lytrivis & A. Amditis, Enhanced curve speed warning application using multiple sources of information for extracting road geometry, *Proceedings of 10th International Conference on Application of Advanced Technologies in Transportation*, Athens, Greece, May 2008.

- [15] J.-S. R. Jang, C.-T. Sun & E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Prentice Hall, ISBN 978-0132610667, United States of America, 1997.
- [16] A. Dempster, A generalization of Bayesian inference, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, Vol. 30, 1968, pp. 205-247.
- [17] G. Shafer, *A Mathematical Theory of Evidence*, Princeton University Press, ISBN 0-608-02508-9, Princeton, 1976.
- [18] A. Polychronopoulos, M. Tsogas, A. Amditis & L. Andreone, Sensor Fusion for Predicting Vehicles' Path for Collision Avoidance Systems, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 8, No. 3, September 2007, pp. 549-562, ISSN 1524-9050.
- [19] D. Dubois & H. Prade, *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*, Academic Press, New York, 1980.
- [20] J. Bernardo & A. Smith, *Bayesian Theory (Wiley Series in Probability and Statistics)*, John Wiley & Sons Ltd, ISBN 978-0471494645, 2000.
- [21] W. Bolstad, *Introduction to Bayesian Statistics (second edition)*, Wiley-Interscience, ISBN 978-0470141151, United States of America, 2007.
- [22] M. Tsogas, A. Polychronopoulos, N. Floudas & A. Amditis, Situation refinement for vehicle maneuver identification and driver's intention prediction, *Proceedings of 10th International Conference on Information Fusion*, ISBN 978-0-662-45804-3, Québec, Canada, July 2007.
- [23] M. Tsogas, X. Dai, G. Thomaidis, P. Lytrivis & A. Amditis, Detection of maneuvers using evidence theory, *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2008*, pp. 126-131, ISBN 978-1-4244-2568-6, Eindhoven, The Netherlands, June 2008.
- [24] C.-S. Liu & H. Peng, Road Friction Coefficient Estimation For Vehicle Path Prediction, *Vehicle System Dynamics*, Vol.25 Suppl., pp.413-425, 1996.
- [25] H. Pacejka, *Tyre and Vehicle Dynamics (second edition)*, Butterworth-Heinemann Ltd, ISBN 980-0-7506-6918-4, United Kingdom, 2006.
- [26] Finn V. Jensen, Thomas D. Nielsen, *Bayesian Networks and Decision Graphs*, Second edition, Springer, ISBN 978-0-387-68281-5, New York, 2007.
- [27] K. Korb & A. Nicholson, *Bayesian Artificial Intelligence*, Chapman & Hall/CRC, ISBN 1-58488-387-1, United states of America, 2004.
- [28] P. Lytrivis, G. Thomaidis & A. Amditis, A vehicle-to-vehicle cooperative collision warning application, *Proceedings of 10th International Conference on Application of Advanced Technologies in Transportation*, Athens, Greece, May 2008.
- [29] J. J. Blum, A. Eskandarian and L. J. Hoffman, Challenges of intervehicle ad hoc networks, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems* Vol. 5, issue 4, December 2004, pp. 347-351.
- [30] Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems-5GHz Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, September 2003.

- [31] IEEE Standards Association, IEEE P1609.1 – Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Resource Manager, IEEE P1609.2 – Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Security Services for Applications and Management Messages, IEEE P1609.3 – Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Networking Services, IEEE P1609.4 – Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Multi-Channel Operations, adopted for trial-use in 2007, IEEE Operations Center, 445 Hoes Lane, Piscataway, NJ, 2007.
- [32] International Organization for Standardization, Intelligent Transport System-Continuous Air Interface Long and Medium (CALM) – Medium Service Access Point, Draft International Standard ISO/DIS 21218, 2007.
- [33] ISO TC204 WG16, available at <http://www.isotc204.com>.
- [34] CAR 2 CAR Communication Consortium (C2C-CC), available at <http://www.car-to-car.org/>.
- [35] CAR 2 CAR Communication Consortium, C2C-CC Manifesto, Version 1.1, August 2007, available at <http://www.car-to-car.org/>.
- [36] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), available at <http://www.etsi.org/WebSite/homepage.aspx>.
- [37] SAFESPOT “Cooperative vehicles and road infrastructure for road safety”, *Integrated Project co-funded by the European Commission*, <http://www.safespot-eu.org>.
- [38] CVIS “Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems”, *Integrated Project co-funded by the European Commission*, <http://www.cvisproject.org>.
- [39] COOPERS “Co-operative Systems for Intelligent road Safety”, *Integrated Project co-funded by the European Commission*, <http://www.coopers-ip.eu>.
- [40] IEEE Draft Standard for Information Technology - *Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications*, Amendment 7: Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE).
- [41] NoW – Network on Wheels, available at <http://www.network-on-wheels.de>.
- [42] A. Festag et al., NoW – Network on Wheels: Project Objectives, Technology, and Achievements, in 5th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT), March 2008.
- [43] Christian Zott, Sheung Ying Yuen, Christopher Brown, Christine Bartels, Zoltan Papp, Bart Netten, “SAFESPOT Local Dynamic Maps – Context-Dependent View Generation of a Platform’s State & Environment”, *15th World Congress on ITS 2008*, November 2008, New York, USA.
- [44] V. Devarapalli, R. Wakikawa, A. Petrescu and P. Thubert, *Network Mobility (NEMO) Basic Support*, RFC 3963, January 2005.
- [45] Fan Li and Yu Wang, “Routing in vehicular ad hoc networks: A survey”, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, June 2007, Vol. 2, Issue 2, pp. 12-22.

- [46] Kevin C. Lee, Uichin Lee and Mario Gerla, "Survey of Routing Protocols in Vehicular Ad Hoc Networks", *Advances in Vehicular Ad-Hoc Networks*, M.Watfa Book Editor, IGI Global, (Book chapter – Book to be published in September 2010).
- [47] A. Iwata et al., "Scalable Routing Strategies for Ad-hoc Wireless Networks," *IEEE JSAC*, Aug. 1999, pp. 1369–79.
- [48] G. Pei, M. Gerla and T.-W. Chen, "Fisheye State Routing: A Routing Scheme for Ad Hoc Wireless Networks," *Proc. ICC 2000*, New Orleans, LA, June 2000.
- [49] C. E. Perkins and E. M. Royer, "Ad-Hoc On-Demand Distance Vector Routing," *Proc. IEEE WMCSA '99*, New Orleans, LA, Feb. 1999, pp. 90–100.
- [50] D. B. Johnson and D. A. Maltz, "Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks," *Mobile Computing*, T. Imielinski and H. Korth, Eds., Ch. 5, Kluwer, 1996, pp. 153–81.
- [51] V. Naumov and T. R. Gross, "Connectivity-Aware Routing (CAR) in Vehicular Ad-hoc Networks," *INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications*. IEEE , vol., no., pp.1919-1927, 6-12 May, 2007.
- [52] C. Lochert, H. Hartenstein, J. Tian, H. Fussler, D. Hermann, M. Mauve, "A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments," *Intelligent Vehicles Symposium*, 2003. *Proceedings. IEEE* , vol., no., pp. 156-161, 9-11 June 2003.
- [53] B.-C. Seet, G. Liu, B.-S. Lee, C. H. Foh, K. J. Wong, K.-K. Lee, "A-STAR: A Mobile Ad Hoc Routing Strategy for Metropolis Vehicular Communications." *NETWORKING 2004*, 989-999.
- [54] Jinhua Guo and Nathan Balon, "Vehicular Ad Hoc Networks and Dedicated Short-Range Communication", for the *Handbook on Mobile Ad Hoc and Pervasive Communications*, American Scientific Publishers, USA, December 2006.
- [55] L. Fischer, F. Stumpf, C. Eckert, "Trust, Security and Privacy in VANETs - A Multilayered Security Architecture for C2C-Communication", In *VDI/VW-Gemeinschaftstagung: Automotive Security*, Wolfsburg, Germany, November 2007.
- [56] F. Kargl, Z. Ma, and E. Schoch, "Security Engineering for VANETs", 4th Workshop on Embedded Security in Cars (escar 2006), Berlin, Germany, 2006.
- [57] Maxim Raya and Jean-Pierre Hubaux, "Securing vehicular ad hoc networks", *Journal of Computer Security* 15 (2007), IOS Press, pp. 39–68.
- [58] Christian Zott, Sheung Ying Yuen, Christopher Brown, Christine Bartels, Zoltan Papp, Bart Netten, "SAFESPOT Local Dynamic Maps – Context-Dependent View Generation of a Platform's State & Environment", *15th World Congress on ITS 2008*, November 2008, New York, USA.
- [59] ETSI TR 102 638 V1.1.1, "Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions", June 2009.

- [60] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connection with graphs", *Numer. Math.*, 1:269–271, 1959.
- [61] R.E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems," in *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. Series D, pp. 35-45, 1960.
- [62] S. P. Meyn and R. L. Tweedie, *Markov Chains and Stochastic Stability*, London: Springer-Verlag, 1993, online: https://netfiles.uiuc.edu/meyn/www/spm_files/book.html, 2nd edition to appear, Cambridge University Press, 2009.
- [63] X. Rong Li and Vesselin P. Jilkov, "Survey of Maneuvering target tracking. Part I: Dynamic Models," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 39, No. 4, October 2003.
- [64] H. W. Sorenson, Ed., *Kalman Filtering: Theory and Application*, Piscataway, NJ: IEEE, 1985.
- [65] A. H. Jazwinski, *Stochastic Processes and Filtering Theory*, San Diego, CA: Academic, 1970.
- [66] T. H. Kerr, "Streamlining Measurement Iteration for EKF Target Tracking," *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions*, Volume 27, Issue 2, pp. 408 – 420, 1991.
- [67] S. Julier and J. K. Uhlmann, "A general method for approximating nonlinear transformations of probability distributions," Robotics Research Group, Department of Engineering Science, University of Oxford, Tech. Rep., 1996.
- [68] E. A. Wan and R. van der Merwe, "The unscented Kalman filter," in *Kalman Filtering and Neural Networks*, S. Haykin, Ed. New York: Wiley, 2001, pp. 221–280.
- [69] R. van der Merwe and E. A. Wan, "The square-root unscented kalman filter for state and parameter-estimation", International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Salt Lake City, Utah, May, 2001.
- [70] L.A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, 8 (3), pp. 338–353, 1965.
- [71] J.-S. R. Jang, C.-T. Sun and E. Mizutani, "Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence," Prentice Hall, 1997.
- [72] M. Sugeno and G. T. Kang, "Structure identification of fuzzy model," *Fuzzy Sets and Systems*, 28:15-33, 1988.
- [73] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 15:116- 132, 1985.
- [74] M. Tsogas, A. Polychronopoulos and A. Amditis, "Unscented Kalman Filter Design for Curvilinear Motion Models Suitable for Automotive Safety Applications," in *Proc. of 8th International Conference on Information Fusion*, Philadelphia, 2005.
- [75] Centro Ricerche Fiat
<http://www.fiatgroup.com/en-us/innovation/crf/Pages/default.aspx>.
- [76] P. Lytrivis, G. Thomaidis, A. Amditis, "Cooperative Path Prediction in Vehicular Environments," in *Proc. 11th Int. IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2008)*, Beijing, 2008, pp. 803–808.
- [77] F. Ahlers, C. Stimming, "Cooperative Laserscanner Pre-Data-Fusion", in *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV 2008)*, Eindhoven, 2008, pp. 1187–1190.

- [78] A. Polychronopoulos, M. Tsogas, A. Amditis, L. Andreone, "Sensor Fusion for Predicting Vehicles' Path for Collision avoidance Systems," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 8, no. 3, September 2007, pp. 549-562.
- [79] S. Shen, L. Hong, S. Cong, "Reliable road vehicle collision prediction with constrained filtering," *Elsevier Signal Processing*, vol. 86, no. 11, 2006, pp. 3339-3356.
- [80] N. Floudas, M. Tsogas, A. Amditis, H. Weigel, "Positioning and path prediction for scenario assessment of safe speed system," in *Proc. 14th World Congress on Intelligent Transportation Systems (ITS 2007)*, Beijing, 2007.
- [81] A. Polychronopoulos, M. Tsogas, A. Amditis, U. Scheunert, L. Andreone, F. Tango, "Dynamic situation and threat assessment for collision warning systems: the EUCLIDE approach," in *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV 2004)*, Parma, 2004, pp. 636-641.
- [82] Y. Bar-Shalom, X. Rong Li, T. Kirubarajan, "Estimation with Applications to Tracking and Navigation, Theory Algorithms and Software," John Wiley & Sons Inc., New York, 2001.
- [83] *Multitarget-Multisensor Tracking: Applications and Advances*, Volume III, – Chapter 2: Survey of Assignment Techniques for Multitarget Tracking, K. R. Pattipati, R. L. Popp, T. Kirubarajan, Y. Bar-Shalom, W. D. Blair Editors, Artech House, Boston-London, 2000.
- [84] D. P. Bertsekas, "Auction Algorithms for Network Flow Problems: A Tutorial Introduction," *Journal of Computational Optimization and its Applications*, May 1992.
- [85] A. Polychronopoulos, A. Amditis, N. Floudas, and H. Lind, "Integrated object and road borders tracking using 77 GHz automotive radars," *Proc. Inst. Electr. Eng.—Radar, Sonar Navigation*, vol. 151, no. 6, pp. 375-381, Dec. 2004.
- [86] N. Floudas, P. Lytrivis, H. Avgoustidis, M. Ahrholdt, G. Thomaidis, A. Amditis, "Track Based Multi Sensor Data Fusion for Collision Mitigation," in *Proc. 11th International Conference on Information Fusion (FUSION 2008)*, Cologne, 2008.
- [87] B. Ristic, S. Arulampalam and N. Gordon, "Beyond the Kalman Filter – Particle filters for tracking applications," Artech House, 2004.
- [88] Y. Bar-Shalom and L. Campo, "The Effect of the Common Process Noise on the Two-Sensor Fused-Track Covariance," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-22, no. 6, November 1986, pp. 803-805.
- [89] A. Dempster, "A generalization of Bayesian inference," *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, Vol. 30, 1968, pp. 205-247.
- [90] G. Shafer, "A Mathematical Theory of Evidence," Princeton University Press, 1976, Princeton.
- [91] J. C. Helton, "Uncertainty and Sensitivity Analysis in the Presence of Stochastic and Subjective Uncertainty," *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 57: 3-76, 1997.
- [92] L.J. Savage, "The Foundations of Statistics," New York, Dover Publications, 1972.
- [93] G. J. Klir and M. J. Wierman, *Uncertainty-Based Information: Elements of Generalized Information Theory*, Heidelberg, Physica-Verlag, 1998.

- [94] Kari Sentz and Scott Ferson, *Combination of Evidence in Dempster-Shafer Theory*, SAND 2002-0835, Unlimited Release, Printed April 2002.
- [95] National Highway Traffic Safety Administration, U.S. Department of Transportation, “*Traffic Safety Facts 2007: A Compilation of Motor Vehicle Crash Data from the Fatality Analysis Reporting System and the General Estimates System*,” DOT HS 811 002.
- [96] Finn V. Jensen, Thomas D. Nielsen, *Bayesian Networks and Decision Graphs*, Second edition, Springer, 2007.
- [97] Peter Jackson, *Introduction to Expert Systems*, 3rd edition, Addison Wesley, 1998.
- [98] Finn V. Jensen, *Introduction to Bayesian Networks*, First edition, Springer, 1997.
- [99] Timo Koski and John Noble, *Bayesian Networks: An Introduction* (Wiley Series in Probability and Statistics), First edition, John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [100] Olivier Pourret, Patrick Naïm and Bruce Marcot, *Bayesian Networks: A Practical Guide to Applications* (Statistics in Practice), John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- [101] Adnan Darwiche, *Modeling and Reasoning with Bayesian Networks*, Cambridge University Press, First edition, 2009.
- [102] J. Bernardo & A. Smith, *Bayesian Theory* (Wiley Series in Probability and Statistics), John Wiley & Sons Ltd, ISBN 978-0471494645, 2000.
- [103] W. Bolstad, *Introduction to Bayesian Statistics* (second edition), Wiley-Interscience, ISBN 978-0470141151, United States of America, 2007.
- [104] Richard E. Neapolitan, *Learning Bayesian Networks*, Prentice Hall, New York, 2003.
- [105] Cowell, R.G., Dawid, P., Lauritzen, S.L., Spiegelhalter, D.J., *Probabilistic Networks and Expert Systems: Exact Computational Methods for Bayesian Networks*, Springer, 1999.
- [106] P. Spirtes, C. Glymour, and R. Scheines, *Causation, Prediction, and Search*, Adaptive Computation and Machine Learning, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, second edition, 2000.
- [107] J. Pearl, *Causality: Models, Reasoning, and Inference*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
- [108] A. P. Dempster, N. M. Laird, D.B. Rubin, “Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm,” *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)* 39 (1): 1–38, 1977.
- [109] S. L. Lauritzen, “The EM algorithm for graphical association models with missing data,” *Computational Statistics & Data Analysis*, 19(2):191–201, Feb. 1995.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

A. Διεθνή επιστημονικά περιοδικά με κριτές

1. Manolis Tsogas, Nikos Floudas, **Panagiotis Lytrivis**, Angelos Amditis, Aris Polychronopoulos, “Combined Lane and Road Attributes Extraction by Fusing Data from Digital Map, Laser Scanner and Camera”, *Elsevier Information Fusion Journal* (Special Issue on Intelligent Transportation Systems), Volume 12, Issue 1, January 2011, pp. 28-36.
2. **Panagiotis Lytrivis**, George Thomaidis, Manolis Tsogas, Angelos Amditis, “An advanced cooperative path prediction algorithm for safety applications in vehicular networks,” *IEEE Transactions on ITS*, accepted for publication.
3. **Panagiotis Lytrivis**, Matthaios Bimpas, Angelos Amditis, Sebastiaan van den Broek, Achim Beutner, Evangelos Bekiaris, Maria Gemou, Maurizio Miglietta, Uwe Kaiser-Dieckhoff, “An Overview of Integrated Lateral Driver Assistance Applications: LATERAL SAFE Approach,” *IEEE ITS Magazine* (under review).

B. Κεφάλαια σε βιβλία

1. **Sensor and Data Fusion**, Edited by: Nada Milisavljevic, ISBN 978-3-902613-52-3, Hard cover, 436 pages, February 2009, Publisher: IN-TECH.
Chapter 7: *Sensor Data Fusion in Automotive Applications*, **Panagiotis Lytrivis**, George Thomaidis and Angelos Amditis.

Γ. Διεθνή επιστημονικά συνέδρια με κριτές

1. Nikos Floudas, **Panagiotis Lytrivis**, Aris Polychronopoulos, Angelos Amditis, “On the Track-to-track Association Problem in Road Environments”, *Proc. of 10th International Conference on Information Fusion (FUSION 2007)*, Quebec City, Canada, July 9-12, 2007.
2. **Panagiotis Lytrivis**, Georgios Thomaidis, Angelos Amditis, “A Vehicle-to-vehicle Cooperative Collision Warning Application”, *Proc. of 10th International Conference on Application of Advanced Technologies in Transportation*, Athens, Greece, May 27-31, 2008.
3. Manolis Tsogas, **Panagiotis Lytrivis**, Angelos Amditis, “Enhanced Curve Speed Warning Application Using Multiple Sources of Information for Extracting Road Geometry”, *Proc. of 10th International Conference on Application of Advanced Technologies in Transportation*, Athens, Greece, May 27-31, 2008.

4. Manolis Tsogas, Xun Dai, George Thomaidis, **Panagiotis Lytrivis**, Angelos Amditis, "Detection of Maneuvers Using Evidence Theory", *Proc. of 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV'08)*, Eindhoven, The Netherlands, June 4-6, 2008, pp. 126-131.
5. George Thomaidis, Manolis Tsogas, **Panagiotis Lytrivis**, Angelos Amditis, "An Environment for Simulating Vehicle's Motion Along Virtual Routes", *Proc. of 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV'08)*, Eindhoven, The Netherlands, June 4-6, 2008, pp. 204-208.
6. Nikos Floudas, **Panagiotis Lytrivis**, Harris Avgoustidis, Malte Ahrholdt, George Thomaidis, Angelos Amditis, "Track Based Multi Sensor Data Fusion for Collision Mitigation", *Proc. of 11th International Conference on Information Fusion (FUSION 2008)*, Cologne, Germany, June 30-July 3, 2008, pp 791-798.
7. **Panagiotis Lytrivis**, George Thomaidis, Angelos Amditis, "Cooperative Path Prediction in Vehicular Environments", *11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2008)*, 12-15 Oct. 2008, Beijing, China, pp. 803-808.
8. **Panagiotis Lytrivis**, George Vafeiadis, Matthaios Bimpas, Angelos Amditis, Christian Zott, *Cooperative Situation Refinement for Vehicular Safety Applications: The SAFESPOT Approach*, 16th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services (ITS 2009), Stockholm, Sweden, 21-25 September 2009.
9. Christian Zott, Stefano Cosenza, **Panagiotis Lytrivis**, Vincenzo Manzoni, Abdelkarim Belhoula, *The SAFESPOT vehicular platform – Environmental perception from sensors and wireless LAN messages*, 16th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services (ITS 2009), Stockholm, Sweden, 21-25 September 2009.
10. George Thomaidis, Leonidas Spinoulas, **Panagiotis Lytrivis**, Malte Ahrholdt, Grant Grubb, Angelos Amditis, "Multiple Hypothesis Tracking for Automated Vehicle Perception," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV'10)*, San Diego, CA, June 21-24, 2010.
11. **Panagiotis Lytrivis**, Manolis Tsogas, George Thomaidis, Giannis Karaseitanidis, and Angelos Amditis, "A Vehicular Filter Suitable for Co-operative Automotive Safety Applications," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV'10)*, San Diego, CA, June 21-24, 2010.
12. Angelos Amditis, **Panagiotis Lytrivis**, Uri Iurgel, Christoph Arndt, Ioannis Karaseitanidis, Henrik Lind, George Thomaidis, "Enhanced perception suitable for active intervention in automotive safety applications - The interactIVe project," *17th ITS World Congress*, BEXCO, Busan, Korea, October 25-29, 2010.
13. George Thomaidis, Christina Kotsiourou, **Panagiotis Lytrivis**, Malte Ahrholdt, Grant Grubb, Ioannis Karaseitanidis, Angelos Amditis, "Road Environment Perception for Automated Vehicles," *17th ITS World Congress*, BEXCO, Busan, Korea, October 25-29, 2010.
14. Vassilis Kaffes, Manolis Tsogas, **Panagiotis Lytrivis**, Angelos Amditis, Christoph Arndt, "Offline Optomization of Curve Speed Warning Applications," *17th ITS World Congress*, BEXCO, Busan, Korea, October 25-29, 2010.

15. **Panagiotis Lytrivis**, George Thomaidis, Ioannis Karaseitanidis, and Angelos Amditis, “Situation Refinement for In-vehicle Platforms in Vehicular Networks,” 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC2010), Madeira Island, Portugal, 19 – 22 September 2010.

Δ. Λοιπές δημοσιεύσεις

1. Florian Ahlers, Tobias Schendzielortz, Fabio Tango, **Panagiotis Lytrivis**, Christian Zott, Kay Fürstenberg, “Data Fusion Structure for the SAFESPOT Platforms”, *2nd Volume of PReVENT Fusion Forum e-Journal*, January 2008.