



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ V2X ΓΙΑ
ΟΧΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

ΚΟΥΤΣΟΥΠΙΑΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ-ΘΩΜΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

Θεόφιλος Χρυσικός
Διδάσκων- Επιστημονικός Συνεργάτης

Λαμία 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ V2X ΓΙΑ
ΟΧΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

ΚΟΥΤΣΟΥΠΙΑΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ-ΘΩΜΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

Θεόφιλος Χρυσικός
Διδάσκων- Επιστημονικός Συνεργάτης

Λαμία 2023



UNIVERSITY OF
THESSALY

SCHOOL OF SCIENCE

DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE & TELECOMMUNICATIONS

STUDY OF CHARACTERISTIC
PARAMETERS OF V2X PROTOCOLS FOR
VEHICULAR COMMUNICATIONS

KOUTSOUPIAS APOSTOLOS-THOMAS

FINAL THESIS

ADVISOR

Theofilos Chrysikos
Tutor

Lamia 2023

«Με ατομική μου ευθύνη και γνωρίζοντας τις κυρώσεις ⁽¹⁾, που προβλέπονται από της διατάξεις της παρ. 6 του άρθρου 22 του Ν. 1599/1986, δηλώνω ότι:

1. Δεν παραθέτω κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί **χωρίς να τα περικλείω σε εισαγωγικά** και χωρίς να αναφέρω το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων συμφοιτητών μου, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάστηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Αναφέρω πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.
2. Δέχομαι ότι η αυτολεξεί **παράθεση χωρίς εισαγωγικά**, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσίασή τους ως δική μου εργασία.
3. Δέχομαι ότι υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορώ να εντάξω στην εργασία μου εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια
4. Δέχομαι όλες τις συνέπειες σε περίπτωση λογοκλοπής ή αντιγραφής.

Ημερομηνία: 16 / 11 / 2023

Ο – Η Δηλ.

(1) «Όποιος εν γνώσει του δηλώνει ψευδή γεγονότα ή αρνείται ή αποκρύπτει τα αληθινά με έγγραφη υπεύθυνη δήλωση του άρθρου 8 παρ. 4 Ν. 1599/1986 τιμωρείται με φυλάκιση τουλάχιστον τριών μηνών. Εάν ο υπαίτιος αυτών των πράξεων σκόπευε να προσπορίσει στον εαυτόν του ή σε άλλον περιουσιακό όφελος βλάπτοντας τρίτον ή σκόπευε να βλάψει άλλον, τιμωρείται με κάθειρξη μέχρι 10 ετών.»

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη εργασία διερευνά το δυναμικό τοπίο των επικοινωνιών οχημάτων (V2X), μια τεχνολογία ζωτικής σημασίας που αναδιαμορφώνει τα συστήματα μεταφορών σε παγκόσμιο επίπεδο. Παρουσιάζονται τα είδη της οχηματικής επικοινωνίας (Κεφάλαιο 1) και τα πρωτόκολλα που έχουν αναπτυχθεί. Εξετάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο πρωτοκόλλων που έχουν επικρατήσει σήμερα, Dedicated Short Range Communication (βασισμένο στο IEEE 802.11p) και Cellular V2X (βασισμένο στο LTE) καθώς και οι ανάγκες που οδήγησαν στη μελέτη και ανάπτυξη της Νέας γενιάς τεχνολογίες IEEE 802.11bd και 5G NR (Κεφάλαιο 2). Στο Κεφάλαιο 3, η εστίαση μετατοπίζεται στα μηνύματα και τις εφαρμογές V2X, προσφέροντας μια λεπτομερή εξέταση των ποικίλων μηνυμάτων που ανταλλάσσονται και των περιπτώσεων χρήσης. Ειδικότερα, το κεφάλαιο αυτό υπογραμμίζει την κρίσιμη διάσταση της ασφάλειας στις επικοινωνίες V2X, περιλαμβάνοντας τις απαιτήσεις ασφαλείας (Security), τους πιθανούς τύπους επιθέσεων και τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα συστήματα V2X. Στο κεφάλαιο 4 συγκρίνουμε το 5G NR με το DSRC και η εργασία κλείνει με τα συμπεράσματα και με την περιγραφή της σημερινής κατάστασης του V2X σε Αμερική και Ευρώπη, τις δυσκολίες που αντιμετωπίζει, τα ανοιχτά θέματα που υπάρχουν καθώς και τις κινήσεις που γίνονται ώστε να επισπευσθεί η υλοποίηση του στα οδικά δίκτυα (Κεφάλαιο 5).

ABSTRACT

This paper explores the dynamic landscape of vehicular communications (V2X), a vital technology that is reshaping transportation systems globally. It presents the types of vehicle communication (Chapter 1) and the protocols that have been developed so far. The technical characteristics of the two currently predominant protocols, Dedicated Short Range Communication (based on IEEE 802.11p) and Cellular V2X (based on LTE) are examined, as well as the needs and requirements that led to the study and development of Next Generation technologies, IEEE 802.11bd and 5G NR (Chapter 2). In Chapter 3, the focus shifts to V2X messaging and applications, offering a detailed examination of the various messages exchanged and Use Cases. In particular, this chapter highlights the critical dimension of Security in V2X communications, including the Security requirements, the possible types of attacks and the challenges that the V2X systems face. Chapter 4, compares 5G NR with DSRC. Finally, the paper concludes with a description of the current status of V2X in America and Europe, the challenges, the open issues, and the moves being made to accelerate its implementation in road networks.

Table of Contents

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	0
ABSTRACT	2
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	5
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	7
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΟΧΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ</u> <u>(VEHICULAR COMMUNICATION)</u>	<u>9</u>
(1.1) ΟΧΗΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ - V2X (VEHICLE TO EVERYTHING)	9
(1.2) ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΟΧΗΜΑ (VEHICLE-TO-VEHICLE, V2V)	10
(1.3) ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΥΠΟΔΟΜΗ (VEHICLE-TO-INFRASTRUCTURE, V2I)	14
(1.4) ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΠΕΖΟ (VEHICLE-TO-PEDESTRIAN, V2P)	17
(1.5) ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΔΙΚΤΥΟ (VEHICLE-TO-NETWORK, V2N)	17
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ V2X.....</u>	<u>19</u>
(2.1) ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	19
(2.2) V2X ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ.....	21
(2.2.1) DEDICATED SHORT-RANGE COMMUNICATION (DSRC) 802.11p, ΑΜΕΡΙΚΗ	23
(2.2.2) INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEM - G5 (ITS-G5) 802.11p, ΕΥΡΩΠΗ.....	27
(2.2.3) LONG-TERM EVOLUTION V2X	30
(2.3) V2X ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ – NEXT GENERATION V2X.....	34
(2.3.1) IEEE 802.11bd	34
(2.3.2) 5G-NR (NEW RADIO) V2X	40
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΗΝΥΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ V2X.....</u>	<u>48</u>
(3.1) V2X ΜΗΝΥΜΑΤΑ	48
(3.2) ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ V2X (USE CASES)	53
(3.2) ΑΣΦΑΛΕΙΑ (SECURITY) ΣΤΗ V2X ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ	58
(3.2.1) ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ (SECURITY REQUIREMENTS)	58
(3.2.2) ΕΙΔΗ ΕΠΙΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΕΙΛΩΝ (ATTACK TYPES - THREATS)	59
(3.2.3) ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΤΩΝ V2X ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ (SECURITY CHALLENGES)	61
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟ MATLAB</u>	<u>64</u>
(4.1) 5G-NR ΜΙΑ ΠΙΟ ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	64
(4.2) ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 5G NR ΓΙΑ ΟΧΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΣΤΟ MATLAB.....	67
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</u>	<u>81</u>
(5.1) ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	81
(5.2) ΣΗΜΕΡΙΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	83

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. ETSI - ITS G5, US DSRC Technical Characteristics [29].....	28
Πίνακας 2. JAPAN Technical Characteristics.....	28
Πίνακας 3 Διαφορές μεταξύ IEEE 802.11p και IEEE 802.11bd.....	40
Πίνακας 4 Διαφορές μεταξύ C-V2X (LTE) και 5G NR V2X.....	47
Πίνακας 5 Συσχέτιση V2X μηνυμάτων σε Αμερική και Ευρώπη.....	53
Πίνακας 6 Είδη επίθεσης και απειλών V2X.....	60
Πίνακας 7 Τεχνικές διαμόρφωσης και απαιτήσεις Eb/No και SNR	79

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Οχηματικές επικοινωνίες V2X.....	10
Εικόνα 2 Τοπολογίες V2X επικοινωνίας.....	14
Εικόνα 3 V2X τεχνολογίες.....	20
Εικόνα 4 Εξέλιξη της V2X τεχνολογίας	21
Εικόνα 5 Στατιστικά παραγωγής οχημάτων παγκοσμίως (2000-2022)	21
Εικόνα 6 DSRC Αμερική – Δέσμευση συχνοτήτων και εφαρμογές	23
Εικόνα 7 Αντιστοίχιση Στοιβάς Πρωτοκόλλου V2X με OSI μοντέλο	24
Εικόνα 8 Στοιβά πρωτοκόλλου και 1609 Πρότυπα, Αμερική.....	26
Εικόνα 9 Ευρώπη – Δέσμευση συχνοτήτων και εφαρμογές.....	28
Εικόνα 10 Στοιβά πρωτοκόλλου και C-ITS Πρότυπα, Ευρώπη	29
Εικόνα 11 ETSI ITS-G5 και IEEE WAVE-DSRC Στοιβά Πρωτοκόλλου	29
Εικόνα 12 Mode 3 και Mode 4 λειτουργίες Sidelink.....	31
Εικόνα 13 LTE-V2X σχήματα υπο-καναλοποίησης; (a) Γειτονικά κανάλια PSSCH+PSCCH, (b) Μη γειτονικά PSSCH+PSCCH	33
Εικόνα 14 IEEE 802.11bd εξέλιξη του IEEE 802.11p.....	35
Εικόνα 15 Αλληλεπίδραση μεταξύ ETSI ITS-G5 IEEE 802.11p οχήματα και ETSI ITS-G5 IEEE 802.11bd οχήματα	36
Εικόνα 16 Σύμβολα Midables που εισάγονται περιοδικά ανάμεσα στα OFDM σύμβολα του μηνύματος	37
Εικόνα 17 Αναμεταδόσεις μηνυμάτων	38
Εικόνα 19 Εξέλιξη και χαρακτηριστικά της Cellular V2X	41
Εικόνα 18 Εξέλιξη του C-V2X - Εκδόσεις	41
Εικόνα 20 Subcarrier spacing στο 5G-NR V2X.....	45
Εικόνα 21 Τρόποι επικοινωνίας 5G-NR: Broadcast, Unicast, Groupcast	46
Εικόνα 22 Κατηγορίες V2X μηνυμάτων.....	48
Εικόνα 23 Υλοποίηση διαμόρφωσης QPSK σε περιβάλλον SIMULINK	70
Εικόνα 24 Λαμβανόμενο σήμα (αστερισμός) στην βαθμίδα συγχρονισμού φορέα στον δέκτη ..	71
Εικόνα 25 Λαμβανόμενο σήμα (αστερισμός) στην βαθμίδα φίλτρου ανυψωμένου συνημιτόνου στον δέκτη.....	71
Εικόνα 26 Λαμβανόμενο σήμα (αστερισμός) στην βαθμίδα συγχρονισμού συμβόλων στον δέκτη	72
Εικόνα 27 FCC Φασματική ανάλυση λαμβανόμενου σήματος ως προς τον θόρυβο.....	72
Εικόνα 28 5G New Radio (NR) με μοντέλο καναλιού NR FR1 TM1.1 (Uniform, QPSK) με SNR=10 dB	73

Εικόνα 29 5G New Radio (NR) με μοντέλο καναλιού NR FR1 TM1.1 (Uniform, QPSK) με SNR=20 dB	74
Εικόνα 30 5G New Radio (NR) με μοντέλο καναλιού NR FR1 TM3.1 (Uniform, 64-QAM) με SNR=10 dB.....	74
Εικόνα 31 5G New Radio (NR) με μοντέλο καναλιού NR FR1 TM3.1 (Uniform, 64-QAM) με SNR=20 dB.....	75
Εικόνα 32 5G New Radio (NR) με μοντέλο καναλιού NR FR1 TM3.1 (Uniform, 64-QAM) με SNR=30 dB.....	75
Εικόνα 33 FCC Απόδοση πρωτοκόλλων LTE (4G) και 802.11p (DSRC) για μεταβολή εμβέλειας και ρυθμού μετάδοσης	79
Εικόνα 34 FCC Τροποποίηση ITS band 5.9GHz.....	84

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

V2X	Vehicle to Everything
ITS	Intelligent Transportation Systems
RSUs	Road-Side Units
OBUs	On Board Units
V2V	Vehicle to Vehicle Communication
V2I	Vehicle to Infrastructure Communication
V2P	Vehicle to Pedestrian Communication
V2N	Vehicle to Network Communication
D2D	Device to Device Communication
DSRC	Dedicated Short Range Communication
ERGS	Electronic Route Guidance System
CACS	Comprehensive Automobile Traffic Control System
IVC	Inter-Vehicle Communication
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
VANET	Vehicular Ad hoc Network
IoV	Internet of Vehicle
WAVE	Wireless Access in Vehicular Environments
LTE	Long Term Evolution
3GPP	3rd Generation Partnership Project
5GAA	5G Automotive Association
C-V2X	Cellular Vehicle to Everything Communications
C-ITS	Cooperative Intelligent Transport Systems
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
NR-V2X	New Radio Vehicle to Everything Communications
FCC	Federal Communication Commission
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
ETC	Electronic Toll Collection
CCH	Control Channel
SSH	Service Channels
BSS	Basic Service Set
OCB	Outside Context of BSS
RTS/CTS	Request to Send/Clear to Send
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
CSMA/CA	Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance
AIFS	Arbitration Inter-Frame Spacing
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
WSMP	Wave Short Message Protocol
GNSS	Global Navigation Satellite System
MNO	Mobile Network Operators
SC-FDMA	Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access
TBs	Transport Blocks
RBs	Resource Blocks
SCI	Sidelink Control Information
PSSCH	Physical Sidelink Shared Channel
PSCCH	Physical Sidelink Control Channel
DMRS	Demodulation Reference Symbols
SB-SPS	Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling
RSRP	Reference Signal Received Power
S-RSSI	Sidelink Received Signal Strength indicator
LDPC	Low Density Parity Check Forward Error Correction Coding
BCC	Binary Convolution Code
UE	User Equipment
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
PSFCH	Physical Sidelink Feedback Channel
CAM	Cooperative Awareness Message
DENM	Decentralized Environmental Notification Message

RHW	Cooperative Road Hazard Warning
SPATEM	Signal Phase and Timing Message
SRM	Signal Request Message
SSM	Signal Status Message
CPM	Collective Perception Message
IVI	In-vehicle Information
MCM	Maneuver Coordination Message
SAE	Society of Automotive Engineers
BSM	Basic Safety Message
EVA	Emergency Vehicle Alert
TIM	Traveler Information Message
CSW	Curve Speed Warning
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
METIS	Mobile and Wireless Communications Enablers for Twenty-Two Information Society
mmWave	Millimeter Wave communications
PKI	Public Key Infrastructure
MAC	Medium Access Control
HMI	Human Machine Interface

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή στις Οχηματικές Επικοινωνίες (Vehicular communication)

Το κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθεί με την περιγραφή και την ανάλυση της οχηματικής επικοινωνίας, των επιμέρους κατηγοριών της καθώς και τους βασικούς λόγους ανάπτυξης και μελέτης της τεχνολογίας V2X.

(1.1) Οχηματική Επικοινωνία - V2X (Vehicle to everything)

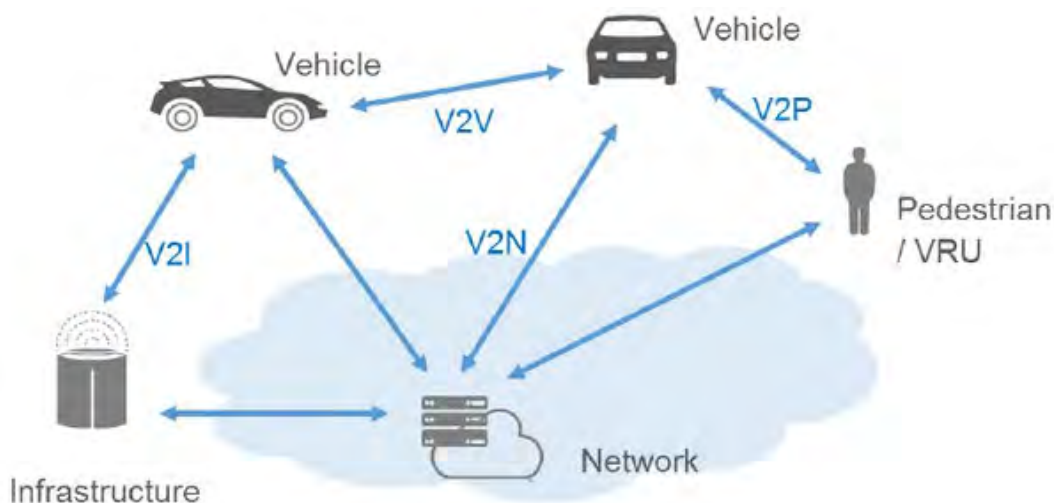
Η προοπτική να χρησιμοποιηθεί η ασύρματη επικοινωνία στα οχήματα έχει τραβήξει το ενδιαφέρον των ερευνητών εδώ και αρκετές δεκαετίες. Τα τελευταία χρόνια όμως, η οχηματική επικοινωνία (Vehicular Communication) έχει σημειώσει μεγάλη πρόοδο τόσο σε ερευνητικό επίπεδο όσο και σε υλοποίηση. Ο τομέας αυτός έχει τραβήξει το ενδιαφέρον της ακαδημαϊκής κοινότητας, της βιομηχανίας και των κυβερνήσεων λόγω της αυξανόμενης ανάγκης που δημιουργείται με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την εισαγωγή των Ευφυών Συστημάτων στη ζωή μας. Η οχηματική επικοινωνία αποτελεί έναν κρίσιμο και σημαντικό κλάδο και περιγράφει την επικοινωνία ενός οχήματος με τα στοιχεία του περιβάλλοντος με τα οποία αλληλοεπιδρά.

Αρχικός και βασικός στόχος της V2X τεχνολογίας είναι η ασφάλεια στις μετακινήσεις, η μείωση της θνησιμότητας λόγω ατυχημάτων και η μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Κάθε χρόνο περίπου ένα εκατομμύριο άνθρωποι χάνουν τη ζωή τους από ατυχήματα που γίνονται μεταξύ οχημάτων, τρένων, μοτοσυκλετών ή πεζών. Επιπλέον, σε πιο προηγμένες εφαρμογές, το V2X μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των ρύπων, οδηγώντας έτσι σε ένα πιο «πράσινο» περιβάλλον. Το είδος της επικοινωνίας αυτής συνηθίζεται να αναφέρεται ως Οχηματική επικοινωνία με τα πάντα (Vehicle to Everything, V2X) [1].

Οι οχηματικές επικοινωνίες V2X είναι το κυριότερο παράδειγμα των «Ευφυών» Συστημάτων Μετακίνησης (Intelligent Transportation Systems – ITS), τα οποία αποσκοπούν στη βελτίωση και στον αποτελεσματικό και αξιόπιστο έλεγχο της κυκλοφορίας [2]. Τα «Ευφυή» συστήματα είναι ετερογενή συστήματα, δηλαδή

περιλαμβάνουν διαφορετικές οντότητες/μονάδες για τη λειτουργία τους, όπως αυτοκίνητα, κόμβους δικτύων, μονάδες παρακείμενου οδικού συστήματος (Road Side Units-RSUs), σηματοδότες και άλλα. Στις μέρες μας, τα οχήματα είναι εφοδιασμένα με τεχνολογίες επικοινωνίας (On Board Units) όπως αισθητήρες, κάμερες, συστήματα πλοήγησης, τα οποία τα καθιστούν ικανά να επικοινωνήσουν μεταξύ τους αλλά και με το περιβάλλον τους. Όλα τα συστήματα αυτά επικοινωνώντας μεταξύ τους δημιουργούν ένα «ευφυές» σύστημα οχηματικής επικοινωνίας V2X.

Το V2X είναι ένας όρος που περιλαμβάνει επικοινωνίες μεταξύ οχημάτων (Vehicle-to-Vehicle, V2V), επικοινωνίες μεταξύ οχήματος με στοιχεία υποδομής (Vehicle-to-Infrastructure, V2I), οχήματος με πεζούς (Vehicle-to-Pedestrian, V2P) και οχήματος με υπηρεσίες δικτύου/νεφελώματος (Vehicle-to-Network, V2N) (Εικόνα 1, [3]). Η αλληλεπίδραση αυτή μεταξύ διαφόρων εμπλεκόμενων οντοτήτων απαιτεί την ανταλλαγή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο και τη χρήση κατάλληλων V2X πρωτοκόλλων επικοινωνίας, τα οποία θα μελετηθούν στο Κεφάλαιο 2.



Εικόνα 1 Οχηματικές επικοινωνίες V2X

(1.2) Επικοινωνία οχήματος με όχημα (Vehicle-to-Vehicle, V2V)

Η τεχνολογία V2V αποτελείται από ασύρματες μεταδόσεις δεδομένων μεταξύ οχημάτων. Τα οχήματα στέλνουν και λαμβάνουν μηνύματα προς όλες τις κατευθύνσεις δημιουργώντας με αυτό το τρόπο ένα σύστημα όπου όλα τα οχήματα

γνωρίζουν την κατάσταση των οχημάτων που βρίσκονται σε κοντινή τους απόσταση. Τα οχήματα μπορούν έτσι, μέσω συγκεκριμένων προγραμμάτων/εφαρμογών που διαθέτουν, να καθορίσουν πιθανά ατυχήματα που επρόκειτο να δημιουργηθούν και η τεχνολογία προειδοποιεί αντίστοιχα τους οδηγούς με σχετικές ειδοποιήσεις (π.χ. οπτικές, ηχητικές) για την αποφυγή τους.

Κύριος σκοπός της V2V επικοινωνίας είναι η αποφυγή πιθανών τέτοιων ατυχημάτων και επιτυγχάνεται με τη συνεχή ανταλλαγή πληροφοριών όπως τοποθεσία, ταχύτητα και επιτάχυνση σε ένα ad-hoc δίκτυο πλέγματος (mesh network) [4]. Το δίκτυο αυτό χρησιμοποιεί ένα αποκεντρωμένο σύστημα σύνδεσης (decentralized connection system), το οποίο μπορεί να παρέχει είτε μια πλήρως συνδεδεμένη τοπολογία πλέγματος (fully connected mesh topology) είτε μια μερικώς συνδεδεμένη τοπολογία πλέγματος (partially connected mesh topology) (Εικόνα 2). Στην περίπτωση του πλήρους συνδεδεμένου πλέγματος, κάθε κόμβος (όχημα) είναι συνδεδεμένο απευθείας με τα υπόλοιπα οχήματα και πραγματοποιεί επικοινωνία ενός άλματος (one hop communication). Στη περίπτωση του μερικώς συνδεδεμένου δικτύου, ορισμένοι κόμβοι (οχήματα) μπορούν να συνδεθούν με όλα τα οχήματα ενώ τα υπόλοιπα συνδέονται μόνο με τα οχήματα με τα οποία ανταλλάσσουν πληροφορίες πιο συχνά. Στη δεύτερη περίπτωση, το όχημα μπορεί να επιλέξει μία από τις διαφορετικές διαδρομές που είναι διαθέσιμες ώστε να φτάσει το μήνυμα στο προορισμό του χρησιμοποιώντας επικοινωνία πολλαπλών αλμάτων (multi hop communication).

Η τοπολογία του αποκεντρωμένου συστήματος σύνδεσης, προσφέρει ένα εύρωστο δίκτυο διότι σε περιπτώσεις προσωρινής δυσλειτουργίας ενός κόμβου ή ολικής κατάρρευσης του συστήματος, δεν κινδυνεύει και η κατάρρευση του δικτύου. Οι διαδρομές των μηνυμάτων υπολογίζονται εκ νέου στους πίνακες προώθησης για να φτάσουν σε όλους τους προορισμούς.

Η επικοινωνία οχήματος με όχημα (V2V) μπορεί να γίνει ασύρματα και σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας διάφορα πλεονεκτήματα:

Βελτιωμένη ασφάλεια:

- Αποφυγή συγκρούσεων: Η επικοινωνία V2V επιτρέπει στα οχήματα να ανταλλάσσουν πληροφορίες σχετικά με την ταχύτητα, την κατεύθυνση

και τη θέση τους. Αυτό επιτρέπει στα οχήματα να προβλέπουν πιθανές συγκρούσεις και να λαμβάνουν προληπτικά μέτρα, μειώνοντας τον κίνδυνο ατυχημάτων.

- Φώτα πέδησης έκτακτης ανάγκης: Τα οχήματα μπορούν να μεταδίδουν πληροφορίες για ξαφνικό φρενάρισμα, βοηθώντας τα κοντινά οχήματα να αντιδράσουν πιο γρήγορα.

Αποτελεσματικότητα της κυκλοφορίας:

- Βελτιστοποίηση της ροής της κυκλοφορίας: Η επικοινωνία V2V μπορεί να διευκολύνει την ομαλή ροή της κυκλοφορίας, επιτρέποντας στα οχήματα να συντονίζονται και να προσαρμόζουν τις ταχύτητές τους. Αυτό μπορεί να συμβάλει στη μείωση της συμφόρησης και στη βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας της κυκλοφορίας.
- Βελτιστοποιημένος χρονισμός των σηματοδοτών κυκλοφορίας: Τα οχήματα μπορούν να επικοινωνούν με τους σηματοδότες για τη βελτιστοποίηση του χρονισμού, μειώνοντας τις περιττές στάσεις και καθυστερήσεις.

Βελτιωμένη ασφάλεια διασταυρώσεων: Η επικοινωνία V2V μπορεί να προειδοποιεί τους οδηγούς όταν υπάρχει πιθανή σύγκρουση σε μια διασταύρωση, ειδικά όταν η ορατότητα είναι περιορισμένη.

Βελτιωμένη επίγνωση της κατάστασης:

- Προειδοποιήσεις τυφλού σημείου: Τα οχήματα μπορούν να στέλνουν ειδοποιήσεις σε κοντινά οχήματα όταν βρίσκονται στα τυφλά σημεία του άλλου, βοηθώντας τους οδηγούς να αποφύγουν μη ασφαλείς αλλαγές λωρίδας.
- Ειδοποιήσεις οδικής κατάστασης: Πληροφορίες σχετικά με τις οδικές συνθήκες, όπως ολισθηρές επιφάνειες ή εμπόδια, μπορούν να ανταλλάσσονται μεταξύ των οχημάτων, ενισχύοντας τη συνολική οδική ασφάλεια.

Υποστήριξη αυτοματοποιημένης οδήγησης:

- Οδήγηση διμοιρίας: Η επικοινωνία V2V είναι ζωτικής σημασίας για την έννοια του platooning, όπου μια ομάδα οχημάτων ταξιδεύει στενά μαζί με ελάχιστη απόσταση παρακολούθησης, συντονισμένη μέσω επικοινωνίας.
- Συντονισμένοι ελιγμοί: Τα οχήματα μπορούν να επικοινωνούν για να συντονίζουν αλλαγές λωρίδας, συγχωνεύσεις και άλλους ελιγμούς, βελτιώνοντας τη συνολική ροή της κυκλοφορίας.

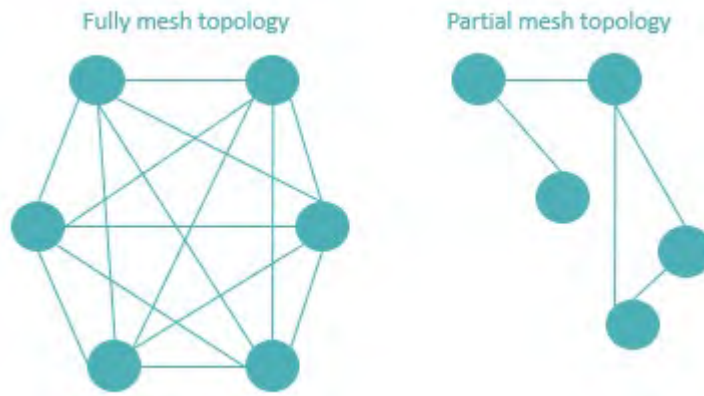
Αποδοτικότητα καυσίμου: Η επικοινωνία V2V μπορεί να βοηθήσει τα οχήματα να διατηρούν τις βέλτιστες ταχύτητες για τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας των καυσίμων και τη μείωση των εκπομπών.

Ενσωμάτωση υποδομών: Το V2V μπορεί επίσης να επεκταθεί στην επικοινωνία με την οδική υποδομή, όπως τα φανάρια και οι πινακίδες, ενισχύοντας τη συνολική διαχείριση της κυκλοφορίας και την ασφάλεια.

Γρήγορη ανταπόκριση σε κινδύνους: Τα οχήματα μπορούν να μεταδίδουν γρήγορα ειδοποιήσεις σχετικά με οδικούς κινδύνους, ατυχήματα ή άλλα απροσδόκητα γεγονότα, επιτρέποντας στους οδηγούς που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση να αντιδράσουν άμεσα.

Δυναμική δρομολόγηση: Η επικοινωνία V2V μπορεί να συμβάλει στο δυναμικό σχεδιασμό διαδρομών, βοηθώντας τα οχήματα να αποφύγουν περιοχές με συμφόρηση και μειώνοντας τις συνολικές εκπομπές.

Ενώ η επικοινωνία V2V προσφέρει πολυάριθμα οφέλη, η επιτυχής εφαρμογή της απαιτεί επίσης την αντιμετώπιση προκλήσεων όπως η ασφάλεια στον κυβερνοχώρο, η τυποποίηση και η ευρεία υιοθέτηση, ώστε να εξασφαλιστεί ένα συνεκτικό και αποτελεσματικό δίκτυο επικοινωνίας στους δρόμους.



Εικόνα 2 Τοπολογίες V2X επικοινωνίας

(1.3) Επικοινωνία οχήματος με υποδομή (Vehicle-to-Infrastructure, V2I)

Η επικοινωνία V2I επιτρέπει στα οχήματα που μετακινούνται να διασυνδεθούν με τα στοιχεία/μονάδες του παρακείμενου οδικού συστήματος (Road Side Units - RSUs), με κύριο στόχο τη βελτιστοποίηση της οδικής ασφάλειας. Οι μονάδες αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν φωτεινούς σηματοδότες, κάμερες, σηματοδότες λωρίδων κυκλοφορίας, λαμπτήρες δρόμου, σήμανση, αναγνώστες RFID και μετρητές στάθμευσης [5].

Συνήθως, οι επικοινωνίες V2I είναι ασύρματες, αμφίδρομες και χρησιμοποιούν συχνότητες επικοινωνίας μικρής εμβέλειας (Dedicated Short Range Communication - DSRC) για τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ του δικτύου (RSU) και του οχήματος (On-board Unit - OBE). Με αυτό το τρόπο, ένα όχημα θα μεταδώσει τις απαραίτητες πληροφορίες (οι οποίες είναι καθορισμένες από το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται) στα Road Side Units, κι αυτά με τη σειρά τους θα τις συλλέξουν και θα τις αναλύσουν, ειδοποιώντας τους οδηγούς των κοντινών οχημάτων για πιθανό κίνδυνο.

Επιπλέον, τα RSUs μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν πύλη (gateway) ώστε να επικοινωνήσει το όχημα με άλλα δίκτυα, όπως το διαδίκτυο.

Η επικοινωνία οχήματος προς υποδομή (V2I) περιλαμβάνει την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ οχημάτων και διαφόρων στοιχείων υποδομής, όπως φωτεινοί σηματοδότες, πινακίδες και κεντρικά συστήματα διαχείρισης της κυκλοφορίας. Ενώ η επικοινωνία V2I έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει τη ροή της κυκλοφορίας, την

ασφάλεια και τη συνολική αποδοτικότητα των μεταφορών, αντιμετωπίζει επίσης αρκετές προκλήσεις. Ορισμένες από τις βασικές προκλήσεις περιλαμβάνουν:

Επενδύσεις σε υποδομές: Η ανάπτυξη της απαραίτητης υποδομής επικοινωνίας μπορεί να είναι δαπανηρή. Η αναβάθμιση της υπάρχουσας υποδομής ή η εφαρμογή νέων τεχνολογιών μπορεί να απαιτήσει σημαντικές οικονομικές επενδύσεις από κυβερνητικές υπηρεσίες ή ιδιωτικούς φορείς.

Διαλειτουργικότητα: Η διασφάλιση ότι τα διάφορα συστήματα V2I μπορούν να επικοινωνούν και να ανταλλάσσουν πληροφορίες απρόσκοπτα αποτελεί σημαντική πρόκληση. Η τυποποίηση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας και των μορφοτύπων δεδομένων είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη διαλειτουργικότητας μεταξύ διαφορετικών συστημάτων.

Προβλήματα ασφάλειας: Τα συστήματα V2I είναι ευάλωτα σε επιθέσεις στον κυβερνοχώρο, οι οποίες θα μπορούσαν να έχουν σοβαρές συνέπειες για τη διαχείριση της κυκλοφορίας και την ασφάλεια. Η διασφάλιση της ασφάλειας των διαύλων επικοινωνίας και της υποδομής είναι απαραίτητη για την αποτροπή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης και κακόβουλων δραστηριοτήτων.

Ζητήματα προστασίας της ιδιωτικής ζωής: Τα συστήματα V2I συνεπάγονται τη συλλογή και την ανταλλαγή δεδομένων, γεγονός που εγείρει ανησυχίες σχετικά με την προστασία της ιδιωτικής ζωής. Οι ενδιαφερόμενοι φορείς πρέπει να θεσπίσουν σαφείς πολιτικές και πρακτικές για την προστασία της ιδιωτικής ζωής των ατόμων, επιτρέποντας παράλληλα την αποτελεσματική επικοινωνία για τη διαχείριση της κυκλοφορίας.

Αξιοπιστία και πλεονασμός: Τα συστήματα επικοινωνίας V2I πρέπει να είναι εξαιρετικά αξιόπιστα για να διασφαλίζουν την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα της διαχείρισης της κυκλοφορίας. Η καθιέρωση μηχανισμών πλεονασμού και εναλλαγής είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της επικοινωνίας σε περίπτωση βλαβών ή διαταραχών του συστήματος.

Επεκτασιμότητα: Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των συνδεδεμένων οχημάτων και των στοιχείων υποδομής, το σύστημα V2I πρέπει να είναι επεκτάσιμο για να μπορεί να διαχειρίζεται τον αυξανόμενο όγκο δεδομένων και αιτήσεων επικοινωνίας. Ο σχεδιασμός συστημάτων που μπορούν να κλιμακωθούν αποτελεσματικά αποτελεί βασικό στοιχείο.

Κατανομή φάσματος: Το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία V2I είναι ένας περιορισμένος πόρος. Ο συντονισμός και η αποτελεσματική κατανομή του φάσματος είναι ουσιαστικής σημασίας για την αποφυγή παρεμβολών και συμφόρησης, ιδίως σε αστικές περιοχές με υψηλή πυκνότητα κυκλοφορίας.

Αποδοχή και υιοθέτηση από το κοινό: Η ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας V2I εξαρτάται από την αποδοχή του κοινού. Η διασφάλιση ότι οι χρήστες κατανοούν τα οφέλη αυτών των συστημάτων και η αντιμετώπιση των ανησυχιών σχετικά με την ασφάλεια, την ιδιωτικότητα και την αξιοπιστία είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή εφαρμογή.

Κληροδοτημένη υποδομή: Η ενσωμάτωση της επικοινωνίας V2I με την υπάρχουσα παλαιά υποδομή μπορεί να αποτελέσει πρόκληση. Πολλές πόλεις διαθέτουν παλαιότερα συστήματα διαχείρισης της κυκλοφορίας και η ενημέρωση ή η εκ των υστέρων εγκατάστασή τους για την υποστήριξη σύγχρονων προτύπων επικοινωνίας μπορεί να δημιουργήσει δυσκολίες.

Ρυθμιστικά και νομικά πλαίσια: Η θέσπιση κατάλληλων ρυθμιστικών πλαισίων για τη ρύθμιση της επικοινωνίας V2I είναι απαραίτητη. Πρέπει να καθοριστούν και να εφαρμοστούν σαφείς κατευθυντήριες γραμμές σχετικά με την ιδιοκτησία των δεδομένων, την ευθύνη και τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς περί προστασίας της ιδιωτικής ζωής.

Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων απαιτεί συνεργασία μεταξύ κυβερνητικών υπηρεσιών, ιδιωτικών φορέων και προγραμματιστών τεχνολογίας για τη δημιουργία ισχυρών και τυποποιημένων συστημάτων V2I που θα ενισχύσουν τη συνολική αποτελεσματικότητα και ασφάλεια των μεταφορών.

(1.4) Επικοινωνία οχήματος με πεζό (Vehicle-to-Pedestrian, V2P)

Η επικοινωνία V2P δημιουργείται ανάμεσα στο όχημα και τους πεζούς ή άλλους ευάλωτους χρήστες του οδικού δικτύου, όπως παιδιά σε καροτσάκια, ποδηλάτες, άτομα σε αναπηρικά αμαξίδια, ακόμη και άτομα που χρησιμοποιούν τα μέσα μαζικής μεταφοράς. Τα σήματα μεταδίδονται εάν οι πεζοί βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από το όχημα (απόσταση ορισμένη από τα πρωτόκολλα επικοινωνίας). Τα σήματα προειδοποιούν τους οδηγούς για τους πεζούς που πλησιάζουν ή ειδοποιούν τους ίδιους τους πεζούς για την παρουσία οχήματος κοντά τους. Ο πεζός μπορεί να διαθέτει κάποιο σύστημα επικοινωνίας στο κινητό του ή σε κάποια άλλη έξυπνη συσκευή που έχει πάνω του. Χωρίς τις έξυπνες οδικές υποδομές (π.χ., φωτεινοί σηματοδότες, αισθητήρες, κάμερες), δεν μπορεί να επιτευχθεί μια σταθερή σύνδεση V2P.

Το V2P είναι μια τεχνολογία που θα επηρεάσει θετικά την κοινωνία γιατί εκτός από τη διασφάλιση της οδικής ασφάλειας, θα διευκολύνει την αποδοτική μελλοντική κινητικότητα στο δρόμο (future mobility).

(1.5) Επικοινωνία οχήματος με δίκτυο (Vehicle-to-Network, V2N)

Η επικοινωνία V2N είναι η επικοινωνία ανάμεσα στο όχημα και στο δίκτυο. Το δίκτυο μπορεί να είναι μια αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων, όπως επίσης μπορεί να αναφέρεται και στις επικοινωνίες μεταξύ οχημάτων (V2V), τις υποδομές (V2I) καθώς και τις επικοινωνίες με τους πεζούς (V2P), στις περιπτώσεις εκείνες όπου η επικοινωνία γίνεται με τη χρήση κυψελωτών ασύρματων δικτύων.

Με το V2N, τα οχήματα επικοινωνούν με κεντρικούς σταθμούς δεδομένων και συστήματα διαχείρισης έχοντας μια σταθερή, συνεχή και αδιάκοπη επικοινωνία.

Το V2N έχει το πλεονέκτημα ότι προσφέρει υψηλή αξιοπιστία, χαμηλή καθυστέρηση και μεγάλο εύρος ζώνης στις επικοινωνίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Πρωτόκολλα V2X

(2.1) Ιστορική αναδρομή

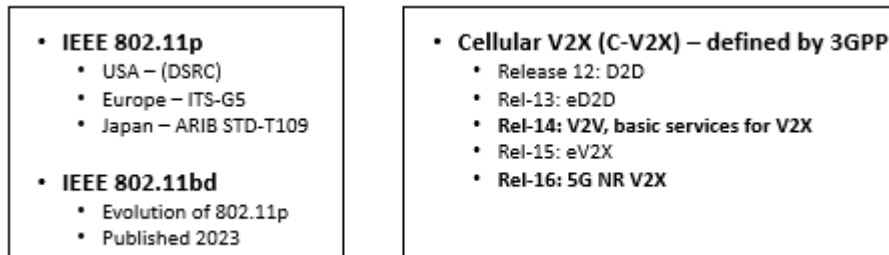
Η επιστήμη γύρω από την τεχνολογία των οχηματικών επικοινωνιών V2X έχει εξελιχθεί σημαντικά στις μέρες μας. Οι έρευνες όμως για την επικοινωνία των οχημάτων έχουν ξεκινήσει και είναι συνεχείς από τη δεκαετία του 1970. Οι έρευνες ξεκίνησαν στην Αμερική και την Ιαπωνία με προγράμματα όπως το ERGS (Electronic Route Guidance System) και CACS (Comprehensive Automobile Traffic Control System) αντίστοιχα [6]. Λίγο αργότερα, τη δεκαετία του 1980 ξεκινάει η έρευνα στις οχηματικές επικοινωνίες Inter-Vehicle Communication (IVC) για την επικοινωνία οχημάτων ή οδηγών, με πρώτο IVC πρόγραμμα στην Ευρώπη το PROMETHEUS.

Το μέσο που χρησιμοποιούνταν για την επικοινωνία εκείνη την εποχή, ήταν οι υπέρυθρες ακτίνες και τα ραδιο-κύματα (VHF, μικροκύματα και κύματα χιλιοστού-mmmWave) και τα πρωτόκολλα βασίζονταν στο CSMA (Carrier Sense Multiple Access) και στο ALOHA [7]. Αργότερα, περισσότερες τεχνολογίες άρχισαν να χρησιμοποιούνται όπως το Bluetooth, IEEE 802.11, GSM, GPRS και 3G, όπου η κάθε μια παρουσίαζε πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα έναντι των άλλων.

Από τότε έως σήμερα, υπάρχουν πολλά ερευνητικά προγράμματα στον κόσμο που έχουν χρηματοδοτηθεί για να μελετήσουν τα πρωτόκολλα, τις συνδέσεις και τις προκλήσεις τους, και έχουν συμβάλει στην πρόοδο του συγκεκριμένου τεχνολογικού τομέα. Ανάλογα με τη χώρα, την τεχνολογία που χρησιμοποιείται ή το πρωτόκολλο, υπάρχουν διάφορες ονομασίες για τον τομέα της επικοινωνίας των οχημάτων, όπως IVC (Inter-Vehicle Communication), VANET (Vehicular Ad hoc Network), Internet of Vehicle (IoV), DSRC (Dedicated Short Range Communication), WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments), ITS-G5 (Intelligent Transport System) [8].

Σήμερα, δύο τεχνολογίες έχουν κυριαρχήσει στο χώρο του V2X, η Dedicated Short Range Communication - (DSRC) (Αποκλειστική Επικοινωνία Μικρής Εμβέλειας) που βασίζεται στο WiFi και η Long Term Evolution for V2X (LTE – V2X) (Μακροχρόνια Εξέλιξη για V2X) βασισμένη στο 3GPP και την κυψελωτή

τεχνολογία 3G (Εικόνα 3). Αν και από πολλούς χρησιμοποιείται ο όρος DSRC όταν αναφέρονται γενικά στο V2X, δεν υπάρχει αποκλειστική σύνδεση μεταξύ του V2X και του DSRC. Κι αυτό γιατί τα δεδομένα που αποστέλλονται από ένα όχημα ή στοιχείο της υποδομής, μπορεί να φτάσουν στον προορισμό τους χρησιμοποιώντας το κυψελωτό δίκτυο αντί της ασύρματης σύνδεσης [9].

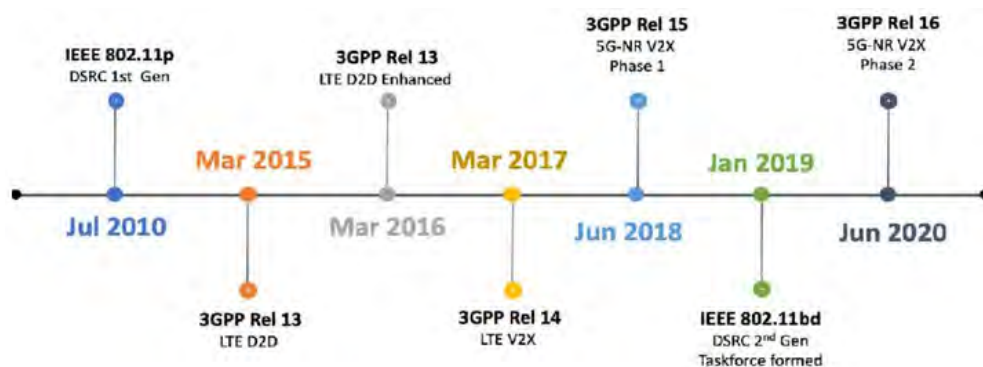


Εικόνα 3 V2X τεχνολογίες

Το 2010, η IEEE δημοσίευσε το WAVE που αποτελούσε τροποποίηση του IEEE 802.11 και αφορούσε στις άμεσες, μικρής εμβέλειας επικοινωνίες οχημάτων. Η τροποποίηση αυτή επίσημα αναφέρεται ως IEEE Std 802.11p-2010. Λίγα χρόνια αργότερα, αυτοκινητοβιομηχανίες όπως η Toyota και η General Motors άρχισαν να ενσωματώνουν τη DSRC (IEEE 802.11p) τεχνολογία σε κάποια μοντέλα αυτοκινήτων τους. Το 2016, η 3GPP δημοσίευσε τα χαρακτηριστικά του LTE-V2X ή C-V2X (Cellular V2X). Το πρωτόκολλο αυτό επιτρέπει εκτός από V2V και V2I, επικοινωνία του οχήματος με το δίκτυο, V2N.

Καθώς φαίνεται, ο κόσμος της τεχνολογίας, της αυτοκινητοβιομηχανίας και των χωρών έχουν χωριστεί όσον αφορά στο ποια τεχνολογία υπερτερεί υπέρ της άλλης. Στην Ιαπωνία και στην Ευρώπη έχουν ήδη αναπτυχθεί λύσεις βασισμένες στο DSRC V2X, με το Golf 8 της VW να είναι το πιο δημοφιλές V2X όχημα στην αγορά. Αντίθετα, στην Αμερική και στην Κίνα φαίνεται να κερδίζει έδαφος το C-V2X με όλο και περισσότερες εταιρείες να συμμετέχουν στο σχηματισμό 5GAA (5G Automotive Association).

Οι απαιτήσεις των νέων πιο προηγμένων εφαρμογών έχουν οδηγήσει στην εξέλιξη των τεχνολογιών αυτών (Εικόνα 4, [10]). Σήμερα, οι έρευνες εστιάζουν στις τεχνολογίες Νέας Γενιάς, οι οποίες θα παρουσιαστούν σε επόμενη παράγραφο.

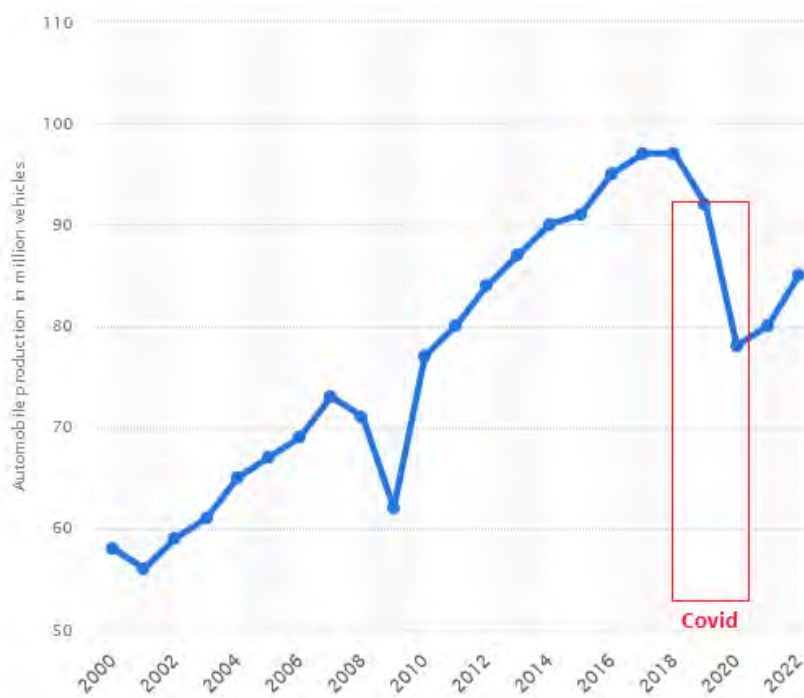


Εικόνα 4 Εξέλιξη της V2X τεχνολογίας

(2.2) V2X τεχνολογίες

Το όχημα είναι το βασικό μέσο με το οποίο γίνεται η μετακίνηση των ανθρώπων και κάθε χρόνο ο αριθμός των οχημάτων που παράγουν οι αυτοκινητοβιομηχανίες αυξάνεται (Εικόνα 5, [11]). Η V2X επικοινωνία αναπτύχθηκε για να παρέχει ασφάλεια στις μετακινήσεις αυτές.

Η πρόοδος της αυτοκινητοβιομηχανίας στον αυτοματισμό των οχημάτων είναι ραγδαία και συνεχίζει να εξελίσσεται καθιστώντας αναγκαίο τα οχήματα και τα οδικά δίκτυα να υποστηρίζουν τις V2X τεχνολογίες.



Εικόνα 5 Στατιστικά παραγωγής οχημάτων παγκοσμίως (2000-2022)

Οι δύο κύριες τεχνολογίες που έχουν επικρατήσει, βασίζονται στην ασύρματη σύνδεση Wi-Fi (IEEE 802.11) και στην κυψελωτή σύνδεση (Cellular). Στην Αμερική, χρησιμοποιείται ο όρος DSRC για την επικοινωνία V2X που βασίζεται στη WiFi τεχνολογία ενώ η Ευρώπη χρησιμοποιεί τον όρο ITS-G5.

Η τροποποίηση IEEE 802.11p (2010) είναι η βάση για το DSRC. Επίσης στο IEEE 802.11p στηρίχθηκε το πρότυπο του στρώματος προσπέλασης (access layer) ITS-G5 που αναπτύχθηκε από το ETSI μετά από εντολή της Ευρωπαϊκής Κομιοσόν να υποστηριχθεί η διαλειτουργικότητα των συνεταιριστικών συστημάτων (C-ITS, Cooperative Intelligent Transport Systems) σε ευφυείς μετακινήσεις στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα. Η επόμενη γενιάς και πιο βελτιωμένη έκδοση είναι η IEEE 802.11bd.

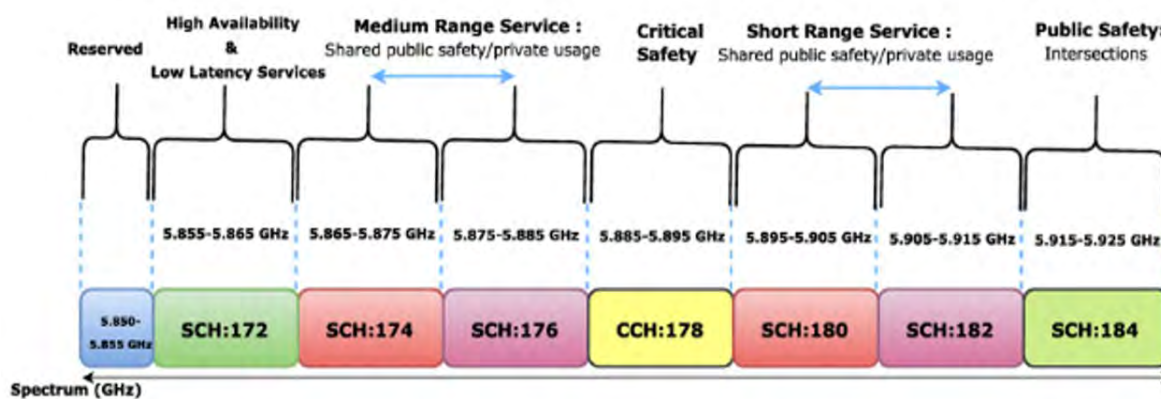
Το 2014, ο φορέας 3GPP ξεκίνησε την έρευνα πάνω στην κυψελωτή τεχνολογία, πως θα μπορούσε να υποστηρίξει ένα V2X σύστημα για να αντικαταστήσει σε βάθος χρόνου το DSRC. Τα χαρακτηριστικά του νέου αυτού πρωτοκόλλου δημοσιεύτηκαν το 2017 με την έκδοση 14 (Release 14). Το νέο αυτό πρωτόκολλο ονομάζεται Cellular V2X, με πρωτόκολλο επικοινωνίας το LTE και νέα βελτιωμένη έκδοση NR-V2X κι έχει την ίδια ονομασία σε Αμερική και Ευρώπη.

Η κάθε τεχνολογία έχει τους υποστηρικτές της στη βιομηχανία και στην ακαδημία όπως οι οργανισμοί 3GPP [12], METIS [13] και το 5GAA [14]. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν αρκετές διαφορές αλλά δεν είναι αλληλοαποκλειόμενες. Τελευταία, έχουν γίνει μελέτες που υποστηρίζουν τη συνύπαρξη της ασύρματης τεχνολογίας με το κυψελωτό δίκτυο οδηγώντας σε ένα ετερογενές σύστημα, το οποίο είναι πιο αποδοτικό αν συγκριθεί με τη κάθε λύση ξεχωριστά. [15] [16] [17]

Οι συχνότητες στις οποίες λειτουργεί η V2X τεχνολογία, δεν καθορίζονται από τα πρωτόκολλα (IEEE 802.11, LTE), αλλά από τους αρμόδιους οργανισμούς σε κάθε χώρα. Στην Αμερική, το FCC (Federal Communication Commission) όπως αντίστοιχα και στην Ευρώπη το ETSI (European Telecommunications Standards Institute) έχουν δεσμεύσει τη ζώνη 5.9GHz για τη V2X επικοινωνία. Στην Ιαπωνία (ARIB) χρησιμοποιείται μόνο η ζώνη 700MHz (755.5 MHz - 764.5 MHz) [18] για ITS επικοινωνίες, αν και η ζώνη στα 5.8GHz η οποία προς το παρόν χρησιμοποιείται για τα Διόδια (ETC – Electronic Toll Collection) και άλλες ITS εφαρμογές, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για προηγμένες ITS εφαρμογές στο μέλλον.

(2.2.1) Dedicated Short-Range Communication (DSRC) 802.11p, Αμερική

Το FCC για το DSRC έχει δεσμεύσει 75MHz στην ζώνη συχνότητας 5.9GHz για το V2X (5850 MHz -5925 MHz). Το φάσμα διαιρείται σε επιπλέον επτά κανάλια, μεγέθους 10MHz το καθένα, με αρχικό σκοπό να χρησιμοποιηθούν τα 10MHz (5885 MHz - 5895 MHz) ως κανάλι ελέγχου (CCH – Control Channel) αποκλειστικά για την ασφάλεια κυκλοφορίας οχημάτων. Στα υπόλοιπα έξι κανάλια εξυπηρέτησης (SCH – Service Channels), αρχικός σκοπός ήταν να χρησιμοποιηθούν άλλα 10MHz (5915 GHz - 5925 GHz) για επικοινωνίες δημόσιας ασφάλειας αφήνοντας τις υπόλοιπες συχνότητες για γενική χρήση όπως φαίνεται στην Εικόνα 6 [19].

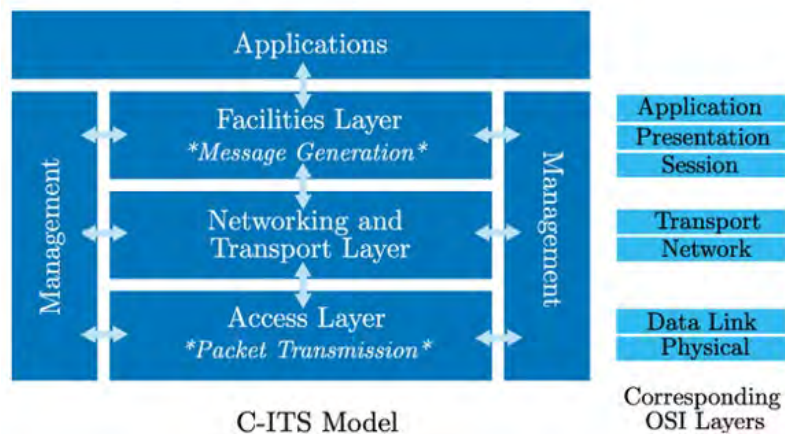


Εικόνα 6 DSRC Αμερική – Δέσμευση συχνοτήτων και εφαρμογές

Η αρχιτεκτονική που ακολουθούν τα πρωτόκολλα αυτά ακολουθούν την αρχιτεκτονική του OSI δικτυακού μοντέλου, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7 [20]. Έχουν γίνει οι απαραίτητες επεκτάσεις ώστε να υποστηρίζονται οι ITS εφαρμογές.

Πιο συγκεκριμένα, η αντιστοίχιση που ακολουθείται είναι:

- Access Layer <-> OSI στρώματα 1 & 2
- Network & Transportation Layer <-> OSI στρώματα 3 & 4
- Facilities layer <-> OSI στρώματα 5,6 & 7



Εικόνα 7 Αντιστοίχιση Στοιβάς Πρωτοκόλλου V2X με OSI μοντέλο

2.2.1.A MAC και PHY στρώματα

Το πρωτόκολλο IEEE 802.11p αποτελεί μια τροποποίηση των στρωμάτων PHY και MAC (Physical/Medium Access Control) του πρωτοκόλλου IEEE 802.11 Wi-Fi. Οι τροποποιήσεις αυτές έγιναν ώστε να μπορέσει το πρωτόκολλο 802.11 να υποστηρίξει την οχηματική επικοινωνία [21] και είναι γενικά κοινές για την Αμερική και την Ευρώπη.

Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο περιλαμβάνει ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ οχημάτων που κινούνται με υψηλή ταχύτητα καθώς και ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ οχημάτων και μονάδων υποδομής (RSUs) στη ζώνη συχνοτήτων 5.9MHz. Στις τροποποιήσεις που έγιναν, καθορίστηκαν οι λειτουργίες που ελέγχονται από το 802.11 MAC και οι υπηρεσίες που απαιτούνται ώστε να υποστηριχθεί πλέον λειτουργία σε ένα δυναμικό περιβάλλον χωρίς να χρειάζεται να υπάρχει ένα παραδοσιακό σύστημα BSS (Basic Service Set, ένα σύνολο κόμβων Wi-Fi που επικοινωνούν μεταξύ τους).

Στην ουσία, έχει απλοποιηθεί η επαλήθευση ταυτότητας (authentication), οι σχετικές διεργασίες και η διαδικασία μετάδοσης δεδομένων πριν αποσταλούν τα πακέτα, οδηγώντας έτσι το όχημα σε ευρεία εκπομπή των πακέτων (broadcast) απευθείας στα γειτονικά οχήματα, τους πεζούς και τα RSUs με ασφάλεια [22]. Πιο συγκεκριμένα, το IEEE802.11p περιέχει μία λειτουργία που ονομάζεται “Outside Context of BSS” ή “OCB”. Στη λειτουργία αυτή δεν χρειάζεται ο έλεγχος επαλήθευσης ταυτότητας, ορίζεται μόνο η συχνότητα και το εύρος ζώνης του καναλιού που γίνεται η επικοινωνία. Κατ’ αυτό το τρόπο, επιτρέπεται στους

σταθμούς να στέλνουν και να λαμβάνουν δεδομένα χωρίς αναγνώριση και εγγραφή σε μία δικτυακή υποδομή ή ένα ad-hoc δίκτυο. Ο χρόνος που χρειάζεται για να ενεργοποιηθεί μία ασύρματη συσκευή μειώνεται έτσι σημαντικά.

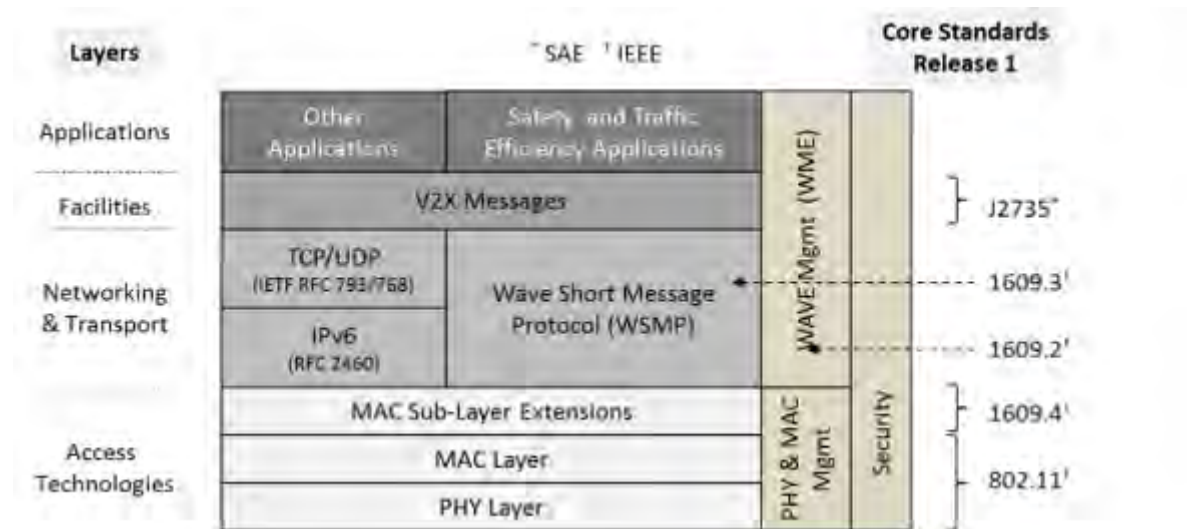
Στις V2X τεχνολογίες ορίζονται δύο τύποι καναλιών, το κανάλι ελέγχου (CCH) και το κανάλι της εξυπηρέτησης (SCH). Στο DSRC, το κανάλι 178 έχει ανατεθεί στο CCH κι έχει τη μεγαλύτερη προτεραιότητα ως κανάλι για κρίσιμες εφαρμογές ασφάλειας. Τα κανάλια εξυπηρέτησης SCH μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για μηνύματα ασφάλειας είτε γενικά για εφαρμογές εξυπηρέτησης. Τα κανάλια αυτά μπορούν επίσης να ενωθούν και να δημιουργηθεί ένα κανάλι 20MHz ώστε να παρέχουν μεγαλύτερο ρυθμό δεδομένων στα 54Mbps.[1]

MAC layer

Το MAC στρώμα στο DSRC αποτελείται από δυο κομμάτια. Το 802.11p αφορά στο χαμηλότερο επίπεδο (Lower MAC) και το IEEE1609.4 λειτουργεί ως το ανώτερο επίπεδο (Upper MAC) (Εικόνα 8, [23]). Στην τεχνολογία αυτή, δεν υπάρχει ο μηχανισμός ACK στην αποστολή πακέτων (acknowledgment). Το CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) δεν απαιτεί το μηχανισμό RTS/CTS (Request to Send/Clear to Send) αυτόματα. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να δημιουργηθούν συγκρούσεις γιατί δύο ή περισσότερα οχήματα θα θέλουν να στείλουν μήνυμα την ίδια χρονική στιγμή. Για το λόγο αυτό, το Contention Window και το back-off time στο 802.11p είναι σταθερά σε σύγκριση με το μηχανισμό εκθετικού χρόνου back-off time στο 802.11a. Ο εκθετικός χρόνος back-off time στο 802.11a μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη χρονοκαθυστέρηση, κάτι που είναι απαγορευτικό για ένα οχηματικό δίκτυο.

Το πρωτόκολλο 1609.4 υλοποιεί το μηχανισμό EDCA (Enhanced Distribution Channel Access), προσφέρει Ποιότητα Εξυπηρέτησης (Quality of Service, QoS) και δίνει τη δυνατότητα εναλλαγής καναλιών (CCH, SCH) κάθε 50ms, που επιτρέπει την ταυτόχρονη πρόσβαση σε κανάλι ελέγχου και σε κανάλι υπηρεσιών/εξυπηρέτησης (Multiple Channel, 1609.4) [24].

Ο μηχανισμός EDCA στο 802.11p πρωτόκολλο, ορίζει συνολικά 8 ουρές για κάθε συνδυασμό Κατηγορίας πρόσβασης (Access Category) και τύπο καναλιού. Κάθε ουρά από αυτές έχει διαφορετικό Contention Window (παράθυρο διαμάχης) και AIFS (Arbitration inter-frame spacing, χρονικό διάστημα μεταξύ των πλαισίων) με αποτέλεσμα τα μηνύματα με τη μεγαλύτερη προτεραιότητα να μεταδίδονται πρώτα.



Εικόνα 8 Στοιβά πρωτοκόλλου και 1609 Πρότυπα, Αμερική

PHY layer

Στο φυσικό επίπεδο (PHY), στο οποίο γίνεται η διαμόρφωση, αποδιαμόρφωση, η διόρθωση λαθών κ.α., έγιναν οι παρακάτω τροποποιήσεις [25]:

- Το εύρος ζώνης ορίστηκε στα 10MHz έναντι των 20MHz που υποστηρίζει το Wi-Fi (802.11a)
- Ο ρυθμός μετάδοσης (bit rate) είναι ο μισός συγκριτικά με το 802.11a, δηλαδή υποστηρίζει 3/4.5/6/9/12/18/24/27 Mbps
- Η διάρκεια του συμβόλου διπλασιάστηκε σε 8μs συγκριτικά με 4μs στο 802.11a
- Το guard time interval είναι 1.6μs ενώ στο 802.11a είναι 0.8μs

Έχουν παραμείνει ίδια:

- Το σχήμα διαμόρφωσης (modulation scheme) BPSK, QPSK, 16QAM και 64QAM
- Ο αριθμός των φορέων δεδομένων (data carriers), 52 σε κάθε σύμβολο

Η τεχνολογία 802.11p χρησιμοποιεί για τη μετάδοση των δεδομένων, πολυπλεξία OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Πολυπλεξία Ορθογωνικής Διάρθρωσης Συχνότητας). Η πολυπλεξία αυτή έχει αποδειχτεί πως είναι ανθεκτική απέναντι σε παρεμβολές και διαλείψεις (fading) και χρησιμοποιεί τα ίδια κομμάτια του πακέτου (preamble, pilot) για συγχρονισμό και εκτίμηση του καναλιού. Η μείωση του εύρους ζώνης στα 10MHz στο 802.11p, έχει διπλασιάσει τις

χρονικές παραμέτρους, όπως τη διάρκεια του OFDM συμβόλου. Οι αλλαγές αυτές στα χαρακτηριστικά του ασύρματου καναλιού, βοηθούν στην προσαρμοστικότητα του καναλιού στις παρεμβολές που προκαλούνται από την εξάπλωση Doppler, λόγω της ταχείας κίνησης των οχημάτων.

Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις τροποποιήσεις του 802.11p αναφέρονται στα [26] και [27].

Στοιβά Πρωτοκόλλου, WAVE

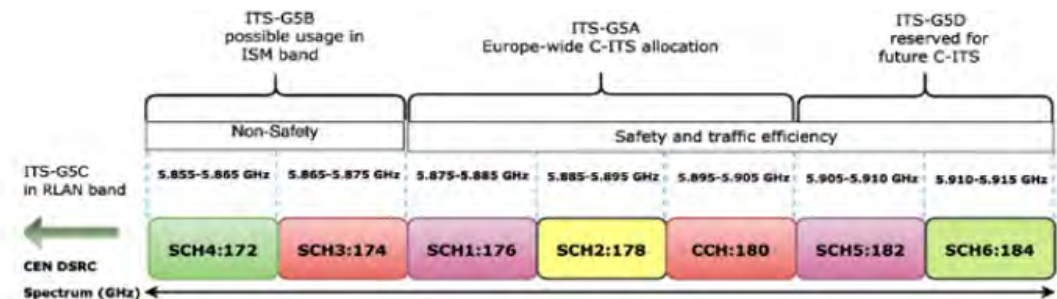
Στα ανώτερα επίπεδα του MAC και PHY στο DSCR (US), το IEEE 802.11p συνοδεύεται από την οικογένεια πρωτοκόλλων IEEE 1609 (τα οποία αναφέρονται και ως WAVE) και SAE (Society of Automotive Engineers). Τα IEEE 1609/WAVE πρότυπα ορίζουν την αρχιτεκτονική δικτύου και τα πρωτόκολλα Ασφαλείας (Security) και το πρότυπο SAE J2735 υλοποιεί το στρώμα εφαρμογών.

Πιο συγκεκριμένα, στο WAVE κάθε πρωτόκολλο ορίζει [28]:

- 1609.1: Διαχειρίσεις πόρων
- 1609.2: Υπηρεσίες ασφαλείας (Security) για εφαρμογές και διαχειριστικά μηνύματα
- 1609.3: Δρομολόγηση και υπηρεσίες στο στρώμα του δικτύου
- 1609.4: Βρίσκεται πάνω από τα επίπεδα 802.11p και παρέχει στα ανώτερα επίπεδα τη δυνατότητα πολυκαναλικής λειτουργίας (multiple channels) χωρίς να γνωρίζουν λεπτομέρειες του φυσικού στρώματος
- 1609.5: Διαχειρίσεις επικοινωνίας

(2.2.2) Intelligent Transportation System - G5 (ITS-G5) 802.11p, Ευρώπη

Στην Ευρώπη το ITS-G5 έχει δεσμεύσει στη ζώνη συχνότητας 5.9 GHz, 70 MHz για V2X επικοινωνία (5855 MHz - 5925 MHz), από τα οποία τα 30MHz (5875 MHz – 5905 MHz) είναι αποκλειστικά για εφαρμογές οδικής ασφάλειας (Εικόνα 9, [19]).



Εικόνα 9 Ευρώπη – Δέσμευση συχνοτήτων και εφαρμογές

MAC και PHY στρώματα

Το στρώμα MAC και PHY του ITS-G5 στην Ευρώπη, είναι κοινό με του DSRC της Αμερικής, εκτός της λειτουργίας Multiple Channel στο MAC επίπεδο, η οποία δεν υποστηρίζεται ακόμη στην Ευρώπη.

Στους παρακάτω πίνακες, υπάρχουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του PHY στρώματος για Ευρώπη/Αμερική και Ιαπωνία.

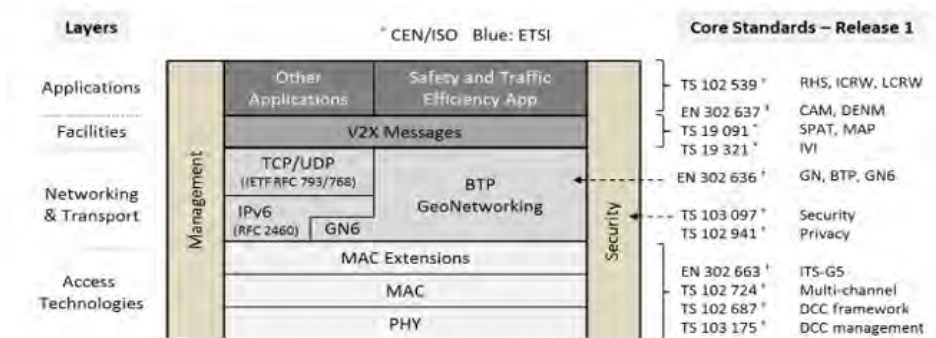
Πίνακας 1. ETSI - ITS G5, US DSRC Technical Characteristics [29]

Στοιχείο	Χαρακτηριστικό μετάδοσης
Συχνότητα λειτουργίας	5.855 – 5.925 MHz (Europe), 5.850 – 5.925MHz (US)
Εύρος καναλιού RF	10 MHz
Ισχύς μετάδοσης RF	Έως 33dBm
Σχήμα διαμόρφωσης	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM (OFMD)
Κώδικας διόρθωσης λαθών	Συνελκτικός (convolutional), ρυθμός = 1/2, 2/3, 3/4
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24, 27
MAC (Media Access control)	CSMA/CA

Πίνακας 2. JAPAN Technical Characteristics

Στοιχείο	Χαρακτηριστικό μετάδοσης
Συχνότητα λειτουργίας	755.5-764.5 MHz (Ιαπωνία)
Εύρος καναλιού RF	< 9 MHz
Σχήμα διαμόρφωσης	BPSK, QPSK, 16QAM, (OFDM)
Κώδικας διόρθωσης λαθών	Συνελκτικός (convolutional), ρυθμός = 1/2, 3/4
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	3, 4.5, 6, 9, 12, 18
MAC (Media Access control)	CSMA/CA

Τα πρωτόκολλα για το στρώμα Δικτύου καθώς και για τα μηνύματα V2X βασίζονται στο IP πρωτόκολλο. Αν και η χρήση των TCP/UDP και IP version 6 είναι παρόμοια μεταξύ Αμερικής και Ευρώπης, το C-ITS ορίζει ένα διαφορετικό τρόπο δρομολόγησης των πακέτων που ονομάζεται GeoNetworking, που περιγράφεται στο ETSI EN 302 636 (Εικόνα 10, [23]). Το αντίστοιχο πεδίο στην Αμερική ονομάζεται WSMP (Wave Short Message Protocol) και περιγράφεται από τα πρωτόκολλα 1609.3 και 1609.2.



Εικόνα 10 Στοιβά πρωτοκόλλου και C-ITS Προτύπα. Ευρώπη



Εικόνα 11 ETSI ITS-G5 και IEEE WAVE-DSRC Στοιβά Πρωτοκόλλου

Το κύριο χαρακτηριστικό του GeoNetworking είναι η χρήση γεωγραφικών συντεταγμένων για την αποστολή των μηνυμάτων. Αυτό έχει το πλεονέκτημα να ανεξαρτητοποιείται η παράδοση του μηνύματος από την απόσταση στην οποία βρίσκεται ο αποδέκτης, κάνοντας πιο αποδοτική τη δρομολόγηση των μηνυμάτων ακόμη και σε περιπτώσεις ενός πυκνού δικτύου που η τοπολογία αλλάζει πολύ συχνά. Η Εικόνα 11 δείχνει τις στοιβές πρωτοκόλλων στην Ευρώπη και στην Αμερική, όπου αν κι έχουν τις ίδιες λειτουργίες, η υλοποίησή τους διαφέρει [30].

Η κυψελωτή οχηματική επικοινωνία (C-V2X) αναπτύχθηκε από τον οργανισμό 3GPP και απευθύνεται στον κλάδο της έξυπνης μετακίνησης (ITS) . Λειτουργεί στη ζώνη συχνότητας ITS 5.9GHz με μελλοντικό στόχο τις ζώνες 6-7GHz, παρέχοντας τροποποιήσεις στην τεχνολογία της ραδιοπρόσβασης ώστε να μπορεί να υποστηρίξει την επικοινωνία με τα οχήματα. Η πρώτη έκδοση του C-V2X στηρίζεται στην LTE (Long Term Evolution) τεχνολογία η οποία ήρθε να προστεθεί στην ήδη υπάρχουσα τεχνολογία DSRC.

Το C-V2X αποτελεί μία ενιαία λύση για τις οχηματικές επικοινωνίες (V2V, V2I, V2P, V2N) και στηρίχθηκε στο ότι η ανάπτυξή του θα είναι γρήγορη, θα έχει χαμηλό κόστος και η εγκατάστασή του θα βασιστεί στο ήδη υπάρχον κυψελωτό δίκτυο κάνοντας έτσι τη μαζική μετακίνηση πιο προσβάσιμη και αποδοτική. Επίσης, η τεχνολογία C-V2X θα υποστηρίξει την επικοινωνία οχήματος με το περιβάλλον σε μία αρκετά μεγάλη ακτίνα.

Το κυψελωτό δίκτυο παρέχει πρόσβαση στην τεχνολογία Νέφους (Cloud) μέσω της αδειοδοτημένης ζώνης συχνοτήτων. Για τις εμπορικές εφαρμογές (φωνή, δεδομένα), το C-V2X μπορεί να χρησιμοποιήσει την V2N τεχνολογία (επικοινωνία οχήματος με το δίκτυο) πάνω στα υπάρχοντα αδειοδοτημένα κυψελωτά δίκτυα. [31]

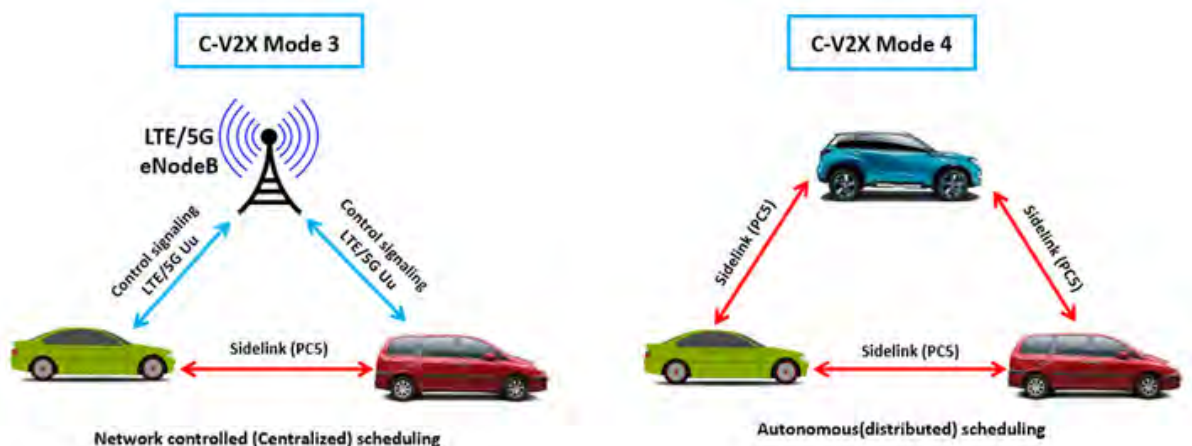
Η τεχνολογία C-V2X ορίζει μια νέα διεπαφή επικοινωνίας για Device-to-Device (συσκευή με συσκευή), δηλαδή V2V, V2P και V2I επικοινωνίες που ονομάζεται PC5/Sidelink. Στις περιπτώσεις αυτές, το C-V2X δε χρειάζεται απαραίτητα τις υποδομές του κυψελωτού δικτύου LTE, μπορεί να λειτουργεί χωρίς κάρτα SIM, και ο συγχρονισμός γίνεται μέσω του GNSS (Global Navigation Satellite System). Αντίθετα, η V2N επικοινωνία κάνει χρήση του συμβατικού δικτύου LTE και της LTE Uu διεπαφής.

Το C-V2X ορίζει δύο συμπληρωματικούς τρόπους μετάδοσης α) Άμεση επικοινωνία για ασφάλεια στις μετακινήσεις ανεξάρτητη από το κυψελωτό δίκτυο και β) Δικτυακή επικοινωνία για τις συμπληρωματικές εφαρμογές.

- Άμεση επικοινωνία V2X με χρήση διεπαφής PC5 (Sidelink): Η τεχνολογία αυτή ονομάζεται και άμεση επικοινωνία μεταξύ των συσκευών και αφορά σε εφαρμογές που η χρονοκαθυστέρηση ενός μηνύματος είναι πολύ κρίσιμη.

Στην ουσία, είναι η τεχνολογία που αφορά στην ασφάλεια των οχηματικών μετακινήσεων. Η έκδοση 14 (Release 14) του πρωτοκόλλου, ορίζει δύο τρόπους λειτουργίας μετάδοσης με βάση τη διεπαφή PC5 (Εικόνα 12, [32]):

- ο *Mode 3 – In-coverage*: Στη περίπτωση αυτή, είναι απαραίτητη η χρήση ενός κεντρικού σταθμού που αναλαμβάνει το συγχρονισμό και το χρονοπρογραμματισμό των πόρων που χρησιμοποιούν τα οχήματα για την επικοινωνία τους (Network control scheduling).
- ο *Mode 4 – Out-of-coverage*: Ο τρόπος αυτός έχει οριστεί για τις περιπτώσεις που τα οχήματα μόνα τους δεσμεύουν τους πόρους που θα χρησιμοποιήσουν βασιζόμενοι στις πληροφορίες που έχουν συλλέξει για το περιβάλλον γύρω τους. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας είναι ο αντίστοιχος της τεχνολογίας DSRC που βασίζεται στο IEEE802.11p, είναι αυτόνομος και ανεξάρτητος (Autonomous scheduling).



Εικόνα 12 Mode 3 και Mode 4 λειτουργίες Sidelink

- Δικτυακή επικοινωνία V2X με χρήση διεπαφής LTE (LTE-Uu): Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί το υπάρχον δίκτυο LTE και τους διαχειριστές κινητής τηλεφωνίας (Mobile Network Operators – MNO). Τα οχήματα μεταδίδουν τα μηνύματα σε έναν εξυπηρετητή (unicast) ο οποίος με τη σειρά του να μεταδίδει (broadcast) σε όλους τους αποδέκτες. Η τεχνολογία αυτή παρέχει τη δυνατότητα λειτουργίας σε μια ευρεία περιοχή, μεγαλύτερη από αυτή της άμεσης επικοινωνίας (direct communication). Χρησιμοποιείται ωστόσο για

εφαρμογές που ο χρόνος αντίδρασης δεν είναι κρίσιμος, γιατί η χρονοκαθυστέρηση (latency) μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη.

ΡΗΥ στρώμα

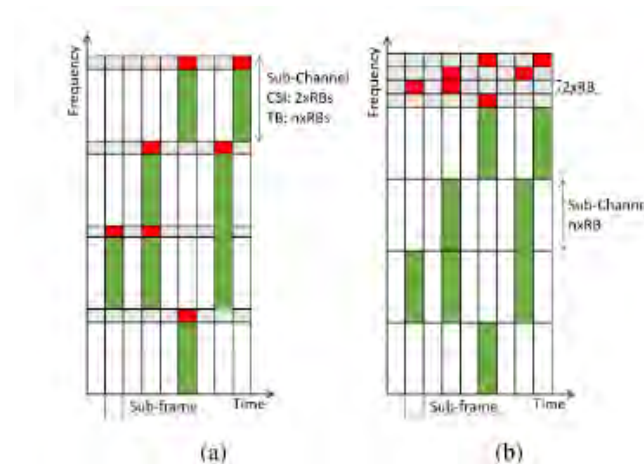
Η C-V2X τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιεί και τα δύο κανάλια 10MHz και 20MHz και χρησιμοποιεί το σχήμα SC-FDMA, Single-Carrier frequency-division multiple access (Πολλαπλή Πρόσβαση Διαιρέσης Συχνότητας Μονής Φέρουσας). [33] Τα δεδομένα στο C-V2X μεταδίδονται σε μπλοκ μεταφοράς (Transport Blocks, TBs), τα οποία αποτελούν ομάδες από μπλοκ πόρων (Resource Blocks, RBs), τα οποία είναι η μικρότερη μονάδα συχνότητας που μπορεί να δεσμευτεί από ένα όχημα. Μαζί με τα δεδομένα, μεταφέρονται και δύο RBs που περιλαμβάνουν πληροφορίες (Sidelink Control Information, SCI) για το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του μηνύματος καθώς και για τα RBs που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των δεδομένων. Τα δεδομένα μεταδίδονται στο κανάλι PSSCH (Physical Sidelink Shared Channel) και το SCI στο Physical Sidelink Control Channel, PSCCH). [34]

Με την έκδοση 14 του πρωτοκόλλου LTE, τα δεδομένα (TBs) χρησιμοποιούν σχήμα διαμόρφωσης 16-QAM ή QPSK ενώ τα SCIs (πληροφορίες ελέγχου) χρησιμοποιούν αποκλειστικά QPSK, μιας και περιέχουν κρίσιμη πληροφορία για τη σωστή λήψη των Transport Blocks.

Στο πεδίο χρόνου, τα κανάλια χωρίζονται σε frames (πλαίσια) και σε subframes (υπο-πλαίσια) με διάρκεια 10ms και 1ms αντίστοιχα το καθένα. Στο πεδίο της συχνότητας κάθε κανάλι χωρίζεται σε subchannels (υπο-κανάλια) και εύρος sub-carrier 15KHz. Κάθε subframe χωρίζεται σε δυο χρονοσχισμές (time slots), όπου η κάθε μια περιέχει 7 σύμβολα. Από τα 14 συνολικά σύμβολα του frame, 9 χρησιμοποιούνται για μετάδοση δεδομένων, τα υπόλοιπα τέσσερα σήματα πιλότοι (pilot signals) αποτελούν τα Demodulation Reference Symbols, DMRS (Αναφορικά σύμβολα αποδιαμόρφωσης) και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του καναλιού, και το τελευταίο σύμβολο λειτουργεί ως ζώνη προστασίας (guard band). [33]

Υπάρχουν δύο πιθανά σχήματα για την υπο-καναλοποίηση (subchannelization) στο LTE-V2X, το σχήμα γειτονικών καναλιών (adjacent channels) PSSCH+PSCCH

κα το σχήμα των μη γειτονικών καναλιών (Εικόνα 13, [35]). Στη περίπτωση των γειτονικών καναλιών, τα TBs και τα SCIs μεταδίδονται σε γειτονικά μπλοκ πόρων. Στη περίπτωση των μη γειτονικών καναλιών, το κανάλι χωρίζεται σε δύο μέρη, ένα δεσμευμένο μέρος με πόρους μόνο για τα δεδομένα ελέγχου SCI, κι ένα τμήμα μόνο για τα δεδομένα TBs. Για να βελτιωθεί η απόδοση του μέσου (link) στην κινητικότητα υψηλής ταχύτητας, το πρωτόκολλο LTE-V2X αναθέτει το τρίτο, έκτο, ένατο και δωδέκατο σύμβολο του κάθε sub-carrier στα Αναφορικά σύμβολα αποδιαμόρφωσης. [35]



Εικόνα 13 LTE-V2X σχήματα υπο-καναλοποίησης; (a) Γειτονικά κανάλια PSSCH+PSCCH, (b) Μη γειτονικά PSSCH+PSCCH

MAC στρώμα

Το MAC στρώμα είναι υπεύθυνο να παρέχει αποδοτική και δίκαιη δέσμευση πόρων στους χρήστες του οχηματικού δικτύου. Χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο SB-SPS (Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling) για το χρονοπρογραμματισμό των πόρων αυτών.

Συγκεκριμένα, κάθε όχημα παρακολουθεί συνεχώς τα subframes μετρώντας τη ληφθείσα ισχύ των σημάτων αναφοράς (Reference Signal Received Power - RSRP) και τον δείκτη ληφθείσας ισχύος του Sidelink (Sidelink Received Signal Strength indicator S-RSSI) για όλα τα Subchannels. Αποθηκεύει τις μετρήσεις αυτές για συγκεκριμένο αριθμό subframes, που ονομάζεται Sensing Window. Οι μετρήσεις αυτές βοηθούν τα οχήματα να αναγνωρίσουν διαθέσιμους πόρους στα subframes αυτά. Αν το ποσοστό των διαθέσιμων πόρων είναι μεγαλύτερο από το 20% όλων των πόρων του καναλιού, τότε το όχημα διαλέγει τυχαία ένα subframe για τη μετάδοση

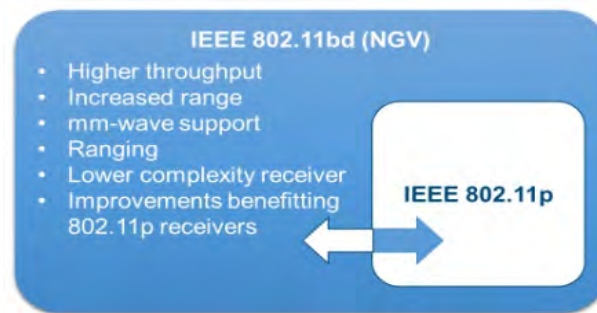
του μηνύματος. Κάθε όχημα μπορεί να δεσμεύσει το ίδιο subframe για τις επόμενες μεταδόσεις, όσες του επιτρέπονται από τον Resource counter, που περιέχει το μέγιστο αριθμό μεταδόσεων που μπορεί ένα όχημα να κάνει χρησιμοποιώντας το ίδιο subframe στο συγκεκριμένο Selection Window. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού βρίσκονται στα [36], [37].

(2.3) V2X Νέας Γενιάς – Next Generation V2X

Τα V2X πρωτόκολλα που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα (802.11p και LTE-V2X) αν και χρησιμοποιούν παλιές τεχνολογίες ως βάση, εκπληρώνουν τις εφαρμογές ασφάλειας πρώτης φάσης (Day 1) ικανοποιητικά, με υψηλή αξιοπιστία (~90%) και χαμηλή χρονοκαθυστέρηση (latency) (έως 100ms). Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, δημιουργούνται καινούριες εφαρμογές όπως τα πλήρως αυτόνομα οχήματα, που τα ήδη υπάρχοντα πρωτόκολλα δε μπορούν να υποστηρίξουν. Οι εφαρμογές αυτές απαιτούν μεγαλύτερη αξιοπιστία συστήματος (~99.9%), πολύ χαμηλές χρονικές καθυστερήσεις (έως 3 ms) και αύξηση στον αριθμό δεδομένων που μεταφέρονται κάθε χρονική στιγμή (high throughput) [33]. Οι αρμόδιοι οργανισμοί έχουν ήδη ξεκινήσει να δουλεύουν γι' αυτές τις βελτιστοποιήσεις στα πρωτόκολλα Νέας Γενιάς V2X.

(2.3.1) IEEE 802.11bd

Το 2018, μια ομάδα του IEEE, η Επόμενη Γενιά V2X (Next generation V2X – NGV Group) ξεκίνησε να δουλεύει πάνω σε μια τροποποίηση του υπάρχοντος πρωτοκόλλου V2X 802.11p, που ονομάστηκε IEEE 802.11bd (Εικόνα 14, [38]). Η τροποποίηση αυτή είχε στόχο υψηλότερη φασματική απόδοση, αυξημένη αξιοπιστία και εκτεταμένη εμβέλεια, διασφαλίζοντας όμως συμβατότητα με τα υπάρχοντα αναπτυγμένα συστήματα ITS στη ζώνη 5.9GHz.



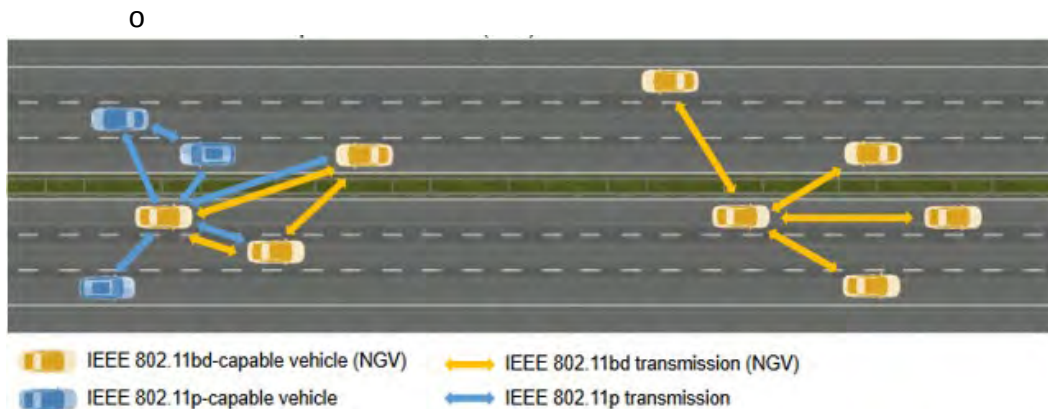
Εικόνα 14 IEEE 802.11bd εξέλιξη του IEEE 802.11p

Για να επιτευχθεί αυτή η συμβατότητα προς τα πίσω, θα πρέπει το IEEE 802.11bd να χρησιμοποιήσει και να βελτιώσει την OCB επικοινωνία του IEEE 802.11p, και να βασιστεί στη μορφή των πακέτων και στους κανόνες πρόσβασης καναλιού που είναι συμβατοί με το IEEE 802.11p.

Υπάρχουν κάποιες απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί το εξελιγμένο πρότυπο IEEE 802.11bd [33]:

- Διαλειτουργικότητα (Interoperability)
 - ο Το πρότυπο IEEE 802.11bd θα πρέπει να είναι πλήρως συνεργάσιμο με το πρότυπο IEEE802.11p. Το IEEE 802.11bd θα πρέπει να μπορεί να υποστηρίζεται από τις συσκευές που είναι εφοδιασμένες με την αρχιτεκτονική του IEEE 802.11p πρωτοκόλλου. Αυτό σημαίνει πως οι συσκευές 802.11bd θα πρέπει να μπορούν να αποκωδικοποιούν IEEE 802.11p μηνύματα και αντίστροφα, οι IEEE 802.11p συσκευές θα πρέπει να μπορούν να αποκωδικοποιούν τουλάχιστον μία μορφή μετάδοσης μηνύματος πρωτοκόλλου IEEE 802.11bd. (Εικόνα 15) [38]
- Συνύπαρξη (Coexistence)
 - ο Τα πρότυπα IEEE802.11p και IEEE802.11bd θα πρέπει να είναι πλήρως λειτουργικά μεταξύ τους. Οι συσκευές 802.11p και 802.11bd θα πρέπει να μπορούν να ανιχνεύουν τις μεταδόσεις μεταξύ τους ώστε να αποφευχθούν οι ταυτόχρονες μεταδόσεις και οι συγκρούσεις.
- Συμβατότητα προς τα πίσω (Backwards Compatibility)

- ο Οι συσκευές που είναι βασισμένες στο πρότυπο IEEE 802.11bd θα πρέπει να είναι συμβατές με τις συσκευές που βασίζονται στην προηγούμενη έκδοση IEEE 802.11p, τουλάχιστον για έναν τρόπο λειτουργίας τους.
- Ισότητα αντιμετώπιση (Fairness)
 - ο Οι συσκευές 802.11p και 802.11bd θα πρέπει να έχουν δικαίω πρόσβαση στο φυσικό μέσω μετάδοσης μηνυμάτων, να έχουν δηλαδή τις ίδιες δυνατότητες εκμετάλλευσης του μέσου.



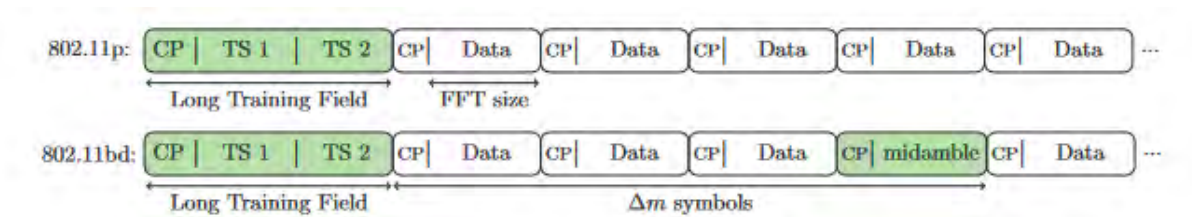
Εικόνα 15 Αλληλεπίδραση μεταξύ ETSI ITS-G5 IEEE 802.11p οχήματα και ETSI ITS-G5 IEEE 802.11bd οχήματα

MAC και PHY στρώματα

Οι αλλαγές που έχουν γίνει σε επίπεδο PHY είναι οι παρακάτω:

- Παραμετροποίηση OFDM (OFDM Numerology):
 - ο Το 802.11bd χρησιμοποιεί αποδοτικότερη παραμετροποίηση OFDMA χρησιμοποιώντας περισσότερες υποφέρουσες (subcarriers) με μικρότερη απόσταση μεταξύ τους. Αυτό προσφέρει καλύτερη φασματική απόδοση συγκριτικά με το 802.11p.
- Μεσαία σύμβολα αναφοράς (Midamble):
 - ο Για την αρχική εκτίμηση του καναλιού στο 802.11p, χρησιμοποιείται το προοίμιο (preamble) της πληροφορίας του frame (πλασιού) που μεταδίδεται. Στην τεχνολογία 802.11bd όμως, το κανάλι ποικίλει στη διάρκεια ενός πλασιού, έτσι η χρήση μόνο του preamble για την εκτίμηση του καναλιού δεν είναι επαρκής. Για το λόγο αυτό, στο 802.11bd χρησιμοποιούνται τα midambles (μεσαία σύμβολα αναφοράς), τα οποία αποτελούν

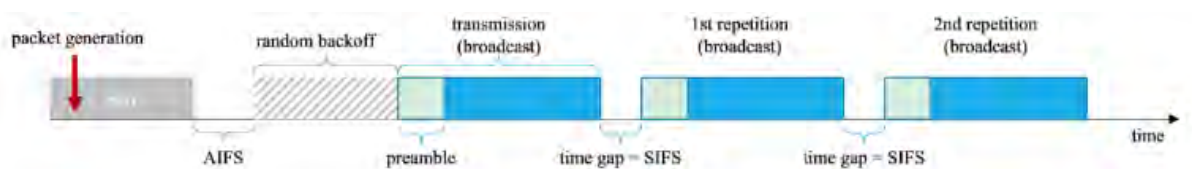
ακολουθίες συμβόλων που εισάγονται μεταξύ των συμβόλων των δεδομένων για να γίνεται η εκτίμηση του καναλιού (Εικόνα 16, [39]). Τα midambles εισάγονται περιοδικά ανάμεσα στα σύμβολα OFDM των δεδομένων και η συχνότητα αυτή εξαρτάται μεταξύ άλλων από το σχήμα διαμόρφωσης και το μέγεθος του φαινομένου Doppler [39].



Εικόνα 16 Σύμβολα Midables που εισάγονται περιοδικά ανάμεσα στα OFDM σύμβολα του μηνύματος

- Τεχνική Υψηλότερης Διαμόρφωσης (Higher Modulation Scheme):
 - ο Εξαντίας της ύπαρξης των μεσαίων συμβόλων αναφοράς (Midambles), το κανάλι μπορεί να εκτιμηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια κι επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί υψηλότερο σχήμα κωδικοποίησης και διαμόρφωσης καναλιού. Στο 802.11bd, στόχος είναι η χρήση σχήματος διαμόρφωσης 256-QAM με ρυθμό κωδικοποίησης 3/4.
- Αξιοπιστία μετάδοσης σήματος χρησιμοποιώντας αναμεταδόσεις (Transmission Reliability Using Retransmissions):
 - ο Για να αυξηθεί η αξιοπιστία στις μεταδόσεις και να μετριάσουν οι διαλείψεις που προκύπτουν από τα πολλαπλά μονοπάτια μεταδόσεων, το 802.11bd έχει ορίσει αναμεταδόσεις πακέτων (Εικόνα 17, [40]). Ο αριθμός των αναμεταδόσεων αυτών εξαρτάται από το φορτίο του καναλιού ώστε να αποφευχθεί ο συνωστισμός. Γενικά, ο μέγιστος αριθμός αναμεταδόσεων έχει οριστεί στις τρεις για κάθε πακέτο που μεταδίδεται.
- Κώδικας διόρθωσης λαθών LDPC (Low Density Parity Check Forward Error Correction Coding):

- ο Ο LDPC κώδικας διόρθωσης λαθών έχει καλύτερη απόδοση από τον κώδικα BCC (Binary Convolution Code) που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο 802.11p
- Βελτιστοποίηση κυματομορφής λήψης (Receiver Waveform Improvements):
 - ο Η ευαισθητοποίηση του λαμβανόμενου σήματος (signal sensitivity) σε σταθερό κανάλι μπορεί να αυξηθεί κατά 6dB.
- Κανάλι μετάδοσης 20MHz (20 MHz Channels for Transmission)
 - ο Δύο διπλανά κανάλια των 10MHz, μπορούν να ενωθούν ώστε να διπλασιαστεί το μέγεθος διακίνησης δεδομένων (throughput) στο κανάλι.
- Εκπομπές μετάδοσης εκτός ορίων καναλιού (Out-of-Channel Transmitter Emissions)
 - ο Οι μεταδόσεις εκτός ορίων καναλιού έχουν μειωθεί στο πρωτόκολλο αυτό, ώστε να μειωθούν οι παρεμβολές μεταξύ δύο διπλανών καναλιών και να είναι πιο δυνατό το σήμα που μεταδίδεται.
- Συχνότητες Χιλιοστομετρικών κυμάτων (Millimeter Wave)
 - ο Το IEEE 802.11bd θα μπορούσε να λειτουργήσει στις συχνότητες 60GHz και πάνω υποστηρίζοντας έτσι εφαρμογές που απαιτούν υψηλό throughput όπως το video streaming, το downloading ψηφιακών χαρτών κλπ. Θα μπορούσε να βασιστεί στα ήδη υπάρχοντα πρωτόκολλα που υποστηρίζουν αυτό το εύρος όπως το 802.11ad και 802.11ay. Το μειονέκτημα είναι πως αυτές οι συχνότητες δε μπορούν να καλύψουν επικοινωνίες σε μεγάλες αποστάσεις.



Εικόνα 17 Αναμεταδόσεις μηνυμάτων

Στο MAC επίπεδο, το πρωτόκολλο IEEE 802.11p έχει ικανοποιητική απόδοση για τις βασικές εφαρμογές ασφάλειας στις οχηματικές επικοινωνίες. Δεν προσφέρει

όμως την επιθυμητή απόδοση στις προηγμένες εφαρμογές, όπως η αυτόνομη οδήγηση. Για το λόγο αυτό έχουν γίνει οι παρακάτω τροποποιήσεις:

1. *Γρήγορη εξυπηρέτηση Υπηρεσιών - Γρήγορη αρχική σύνδεση (Fast Basic Service Set Transition and Fast Initial Link Setup)*: Στις οχηματικές επικοινωνίες εξαιτίας της υψηλής κινητικότητας και των πολλών συνδέσεων, το σύστημα χρησιμοποιεί OCB επικοινωνία (IEEE 802.11p). Αυτό σημαίνει πως τα οχήματα που δεν είναι μέλη ενός κεντρικού σταθμού εξυπηρέτησης, δε χρειάζεται να ακολουθήσουν τις διαδικασίες επαλήθευσης ταυτότητας και συσχέτισης πριν μεταβούν στην εκπομπή πακέτων. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις στην οχηματική επικοινωνία όπου απαιτείται επικοινωνία μέσω ενός κεντρικού σταθμού εξυπηρέτησης. Στις περιπτώσεις αυτές, απαιτείται γρήγορη επαλήθευση ταυτότητας με τα σημεία πρόσβασης (access points) και δέσμευση πόρων (η λειτουργία αυτή ορίζεται στο IEEE 802.11r) καθώς και γρήγορη σύνδεση για την πρώτη συσχέτιση του οχήματος με το σημείο πρόσβασης (IEEE 802.11ai). Αυτές οι λειτουργίες αποτελούν κομμάτι του πρωτοκόλλου 802.11bd.
2. *Ξεχωριστό πακέτο διόρθωσης λαθών (Dedicated Error Correction Packet)*: Στο IEEE802.11bd στέλνεται ένα ξεχωριστό πακέτο για διόρθωση λαθών. Στα πακέτα που αποστέλλονται υπάρχει ένα κομμάτι με τα δεδομένα του κυρίως μηνύματος κι ένα κομμάτι με επιπλέον δυαδικά ψηφία ισοτιμίας (parity bits) κωδικοποιημένα με τον αλγόριθμο Reed Solomon [33]. Ο αριθμός των ψηφίων ισοτιμίας σε ένα πακέτο ποικίλλει ανάλογα με την ταχύτητα των αυτοκινήτων. Μεγαλύτερες ταχύτητες απαιτούν περισσότερα κωδικοποιημένα ψηφία διότι υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα λαθών στη μετάδοση. Η αύξηση αυτή στον αριθμό των ψηφίων ισοτιμίας, οδηγεί σε υπερφόρτωση του δικτύου, οπότε τότε μειώνεται ο αριθμός των ψηφίων ισοτιμίας για την αποσυμφόρηση του δικτύου.

Το IEEE 802.11bd πρωτόκολλο χρησιμοποιεί στοίβα πρωτοκόλλου ίδια με όσα ορίζει το πρωτόκολλο του IEEE 802.11p.

Σύγκριση IEEE802.11p και IEEE802.11bd

Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται οι κύριες τεχνικές διαφορές μεταξύ IEEE 802.11p και IEEE 802.11bd.

Πίνακας 3 Διαφορές μεταξύ IEEE 802.11p και IEEE 802.11bd

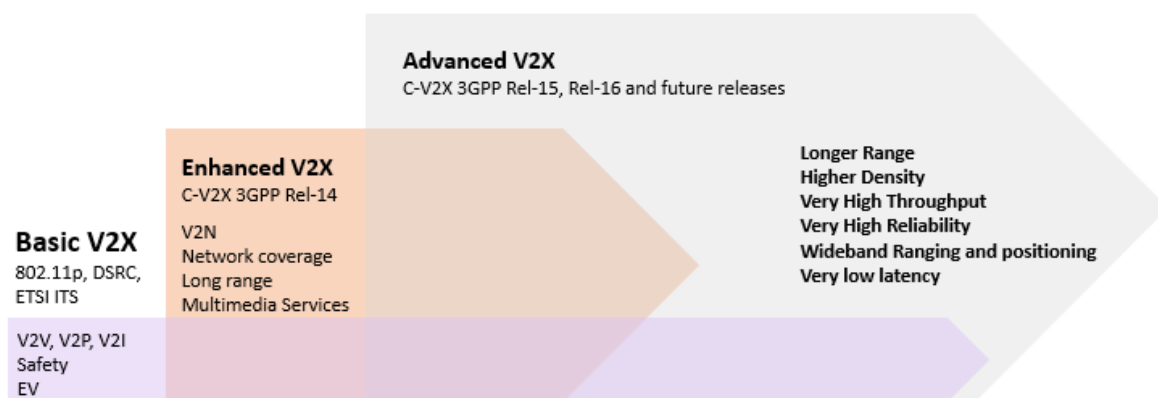
Τεχνικά Χαρακτηριστικά	IEEE 802.11p	IEEE 802.11bd
Ζώνη Συχνότητας	5.9MHz	5.9MHz/ 60GHz (mmWave)
Κώδικας διόρθωσης λαθών	BCC	LDPC
Διάστημα υποφέρουσας OFDM	156.25kHz	312.5KHz, 156.25kHz, 78.125kHz
Εκτίμηση καναλιού	Preamble	Midamble
Μηχανισμός κατά του φαινομένου Doppler	Όχι	Midambles
Σχήμα Διαμόρφωσης	Μέγιστο 64 QAM	Μέγιστο 256-QAM
Εύρος Ζώνης Καναλιού	10 MHz	10 MHz, 20MHz (ένα κανάλι)
Αναμετάδοση	Όχι	Εξαρτάται από το φορτίο του καναλιού (έως 3)
Διόρθωση λαθών	Κομμάτι του πακέτου δεδομένων	Ξεχωριστό πακέτο
Γρήγορη εξυπηρέτηση Υπηρεσιών	Όχι	Ναι
Ταχύτητα αυτοκινήτου	~250 km/h	~500 km/h

(2.3.2) 5G-NR (New Radio) V2X

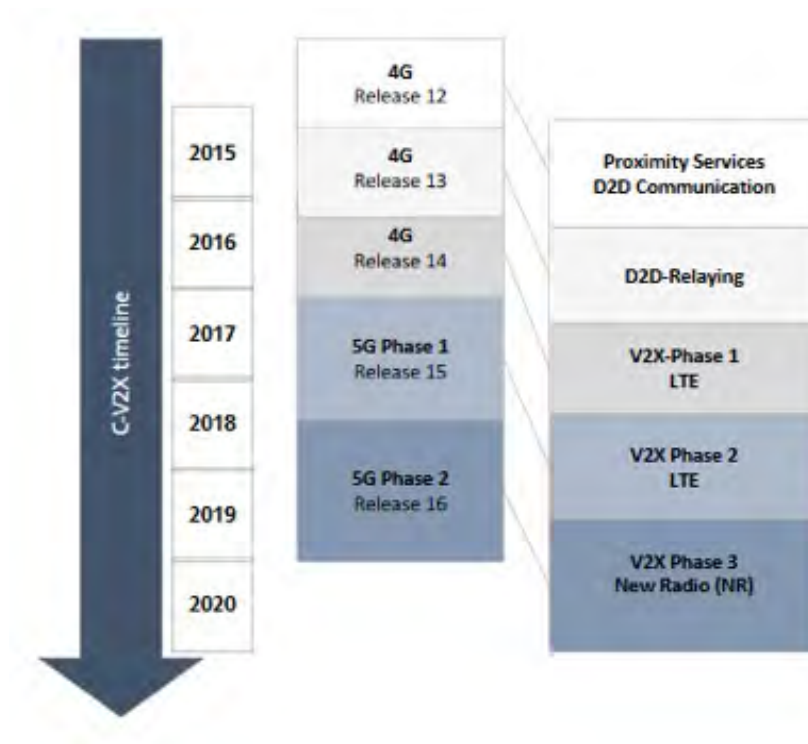
Ο 3GPP δημοσίευσε το 2019 την Έκδοση 16, που περιλαμβάνει το πρώτο V2X πρότυπο που βασίζεται στο 5G New Radio (Νέας Γενιάς Ράδιο) (Εικόνα 18, 19, [41], [42]). Το 5G NR V2X εισάγει προηγμένες λειτουργίες για την υποστήριξη συνδεδεμένων και αυτοματοποιημένων οχημάτων με πολύ αυστηρές απαιτήσεις.

Υπάρχουν όμως και κάποιες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπίσει η καινούρια έκδοση. Λόγω της συνεργατικής ιδιότητας του δικτύου V2X, είναι

απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί η ίδια τεχνολογία επιπέδου πρόσβασης (access layer) σε όλα τα οχήματα. Οι τεχνολογίες C-V2X και ITS-G5 στοχεύουν στην ίδια περιοχή συχνοτήτων 5,9GHz, η οποία χωρίζεται σε κανάλια. Αυτή η περιοχή συχνοτήτων είναι αφιερωμένη στην επικοινωνία ITS. Η έλλειψη συμβατότητας προς τα πίσω της έκδοσης 16 μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα, καθώς καθιστά αναγκαίο τα οχήματα και όλοι οι κόμβοι στο V2X δίκτυο, να υποστηρίζουν και τις δύο τεχνολογίες C-V2X και 5G-NR. Κάτι τέτοιο απαιτεί ακόμη μεγαλύτερο εύρος ζώνης. [43]



Εικόνα 18 Εξέλιξη και χαρακτηριστικά της Cellular V2X



Εικόνα 19 Εξέλιξη του C-V2X - Εκδόσεις

Οι κύριες αλλαγές στο PHY στρώμα του πρωτοκόλλου 5G-NR είναι οι παρακάτω:

- Λειτουργίες Sidelink:

- ο Η V2X τεχνολογία νέα γενιάς 5G NR, ορίζει δύο τρόπους λειτουργίας του Sidelink (Mode 1, Mode 2), παρόμοιους με τους τρόπους λειτουργίας της LTE-V2X (Mode 3 και Mode 4).

- i. Mode 1: Στη λειτουργία αυτή, όπως και στο Mode 3 υποχρεωτικά υπάρχει ένας κεντρικός σταθμός βάση στον οποίο συνδέονται τα οχήματα ώστε να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Ο σταθμός αυτός είναι υπεύθυνος να δεσμεύει πόρους για κάθε όχημα/συσσκευή χρήστη (User Equipment, UE) για τη μετάδοση των μηνυμάτων. Η βελτίωση στο NR V2X, είναι πως όλοι οι κόμβοι/οχήματα αποστέλλουν πληροφορίες για την τοποθεσία τους και την κατεύθυνσή τους (πληροφορίες δέσμης - beam information). Αυτές είναι οι πληροφορίες που θα χρησιμοποιήσει ο σταθμός βάσης για να αποδώσει τους πόρους με βελτιωμένη χωρική επαναχρησιμοποίηση στα οχήματα.

- ii. Mode 2: Στη λειτουργία αυτή, επιτρέπονται επικοινωνίες συσκευή-με-συσσκευή (D2D). Οι πόροι σε μία τέτοια αρχιτεκτονική δεσμεύονται αυτόνομα από τα οχήματα/συσσκευές. Η βελτίωση σε αυτή τη λειτουργία συγκριτικά με τη λειτουργία Mode 4 του συμβατικού C-V2X είναι ότι παρέχει πρόσθετες λειτουργίες που βοηθούν στον μερισμό των πόρων που γίνεται από τα οχήματα. Η λειτουργία Mode 2, υποστηρίζει υποκατηγορίες όπου τα οχήματα μπορούν να βοηθούν άλλα οχήματα στη δέσμευση πόρων αποστέλλοντας πληροφορίες για τους ήδη δεσμευμένους πόρους των οχημάτων όπως επίσης και για την ποιότητα του καναλιού [34]

- 1. Mode 2 (a): Κάθε όχημα/UE αυτόνομα δεσμεύει τους πόρους του (παρόμοια με το Mode 4) κάνοντας χρήση του αλγορίθμου Sensing Based Semi-Persistent Scheduling

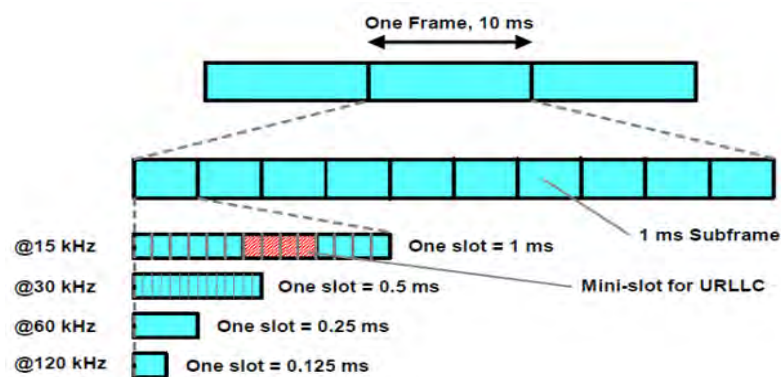
2. Mode 2 (b): Κάθε όχημα/UE βοηθάει τα υπόλοιπα οχήματα να δεσμεύσουν πόρους δίνοντας τους πληροφορίες για τους επιθυμητούς πόρους των πρώτων
 3. Mode 2 (c): Κάθε όχημα/UE επιλέγει και δεσμεύει πόρους βάση ενός προκαθορισμένου προγραμματισμού αίτησης
 4. Mode 2 (d): Κάθε όχημα/UE δεσμεύει πόρους για τις γειτονικές συσκευές χρηστών
- ο Στις τελευταίες συναντήσεις του 3GPP συμφωνήθηκε να μην υποστηρίζονται πλέον οι υπολειτουργίες Mode 2(b) και 2(c) σαν ξεχωριστές λειτουργίες. Αντίθετα θα ενσωματωθούν στις άλλες δύο ώστε να βελτιωθεί επιπλέον η απόδοση της επιλογής πόρων.
 - Κώδικας διόρθωσης λαθών LDPC (Low Density Parity Check Forward Error Correction Coding):
 - ο Στο LTE V2X (C-V2X) χρησιμοποιείται Turbo κωδικοποίηση για την ανίχνευση λαθών. Στην NR τεχνολογία όμως (όπως και στο .11bd) απαιτείται χρήση ενός πιο αποδοτικού αλγορίθμου, του LDPC.
 - ο Στο LTE-V2X χρησιμοποιείται ο Turbo για την κωδικοποίηση των δεδομένων και συνελκτικός κώδικας (Convolution code) για τα ψηφία ελέγχου. Στο NR-V2X χρησιμοποιείται ο LDPC για τα δεδομένα και πολικός κώδικας (Polar code) για τα ψηφία ελέγχου.
 - Σχήμα διαμόρφωσης:
 - ο Το NR υποστηρίζει μεγαλύτερο σχήμα (από)διαμόρφωσης, έως 256-QAM συγκριτικά με το 64-QAM του LTE-V2X.
 - Αριθμός σημάτων (απο)διαμόρφωσης - DMRS:
 - ο Στο LTE-V2X υπάρχουν τέσσερα DMRS σε κάθε subframe για την αποστολή του σήματος πιλότου (Pilot signal). Στο NR, ο αριθμός αυτός μπορεί να μεταβάλλεται.
 - HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request):
 - ο Οι αναμεταδόσεις των πακέτων βασίζονται στην κατάσταση του καναλιού (μέσω του PSFCH – Physical Sidelink Feedback

Channel), το οποίο περιέχει πληροφορίες για την κατάσταση των πακέτων που έχουν μεταδοθεί ώστε οι αναμεταδόσεις να είναι ουσιαστικές και η δέσμευση πόρων αποδοτική. Στο LTE-V2X οι αναμεταδόσεις γίνονται στα τυφλά χωρίς ο αποστολέας να έχει λάβει πληροφορίες για την κατάστασή του πρώτου πακέτου που έχει αποσταλεί, αν έχει παραληφθεί από τα γειτονικά οχήματα ή όχι.

- Πολυπλεξία PSCCH – PSSCH:
 - ο Στην NR-V2X τεχνολογία, τα κανάλια PSCCH – PSSCH πολυπλέκονται στο πεδίο του χρόνου και όχι της συχνότητας όπως στο LTE-V2X. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες καθυστερήσεις στην αποκωδικοποίηση του μηνύματος γιατί ο παραλήπτης δε χρειάζεται να περιμένει να λάβει ολόκληρο το μήνυμα πριν ξεκινήσει να το επεξεργάζεται (όπως συμβαίνει στην τεχνολογία LTE-V2X). Η τροπολογία αυτή είναι απαραίτητη για τις εφαρμογές της νέας γενιάς, όπου ο παράγοντας της χρονοκαθυστέρησης παίζει κρίσιμο ρόλο.
- Γρήγορος προγραμματισμός του Sidelink:
 - ο Στη NR-V2X υποστηρίζεται ένας καινούριος μηχανισμός όπου ένα όχημα στέλνει σε μόνο ένα μήνυμα τις πληροφορίες που χρειάζονται ώστε να δεσμευτούν/προγραμματιστούν οι πόροι που θα χρησιμοποιήσει για τη μετάδοση μηνύματος δεδομένων. Αντίθετα, στη LTE-V2X τεχνολογία, ο προγραμματισμός αυτός γινόταν με την αποστολή δύο τέτοιων μηνυμάτων, το πρώτο για να αιτηθεί το όχημα τη δέσμευση πόρων και να πάρει έναν πόρο μετάδοσης και το δεύτερο για να δεσμεύσει τους πόρους που απαιτούνται για τη μετάδοση του μηνύματος δεδομένων. Κατά συνέπεια, ο μηχανισμός αυτός έπρεπε να βελτιωθεί από άποψη χρόνου.
- Δέσμευση πόρων για κρίσιμα μηνύματα
 - ο Στο NR-V2X υποστηρίζεται ένας μηχανισμός όπου τα οχήματα που θέλουν να μεταδώσουν ένα κρίσιμο μήνυμα, στέλνουν έναν

σήμα «δείκτη» (Indicator signal) στα υπόλοιπα οχήματα. Αν κάποιο από τα υπόλοιπα οχήματα που λάβουν το μήνυμα έχει δεσμεύσει πόρους για μετάδοση μηνυμάτων μικρότερης σημαντικότητας, τότε αποδεσμεύει τους αντίστοιχους πόρους ώστε να χρησιμοποιηθούν από το όχημα που θέλει να στείλει το κρίσιμο μήνυμα.

- Απόσταση subcarriers (Subcarrier spacing):
 - ο Στη LTE-V2X τεχνολογία, η απόσταση των subcarrier ορίζεται αυστηρά σε εύρος ζώνης 15kHz. Η NR τεχνολογία είναι πιο ευέλικτη στις αποστάσεις των subcarriers, και υποστηρίζει αποστάσεις 15kHz, 30kHz, 60kHz (και 120MHz στα mmWave). Με την αλλαγή αυτή μειώνεται η χρονοκαθυστέρηση. Για παράδειγμα, αν ένα όχημα χρειάζεται μια χρονοσχισμή (time slot) για να μεταδώσει ένα μήνυμα, τότε ο χρόνος μετάδοσης μειώνεται καθώς αυξάνεται το μέγεθος του subcarrier. Όταν αυξάνεται το μέγεθος του subcarrier, το μέγεθος της χρονοσχισμής ελαττώνεται (Εικόνα 20, [44]).



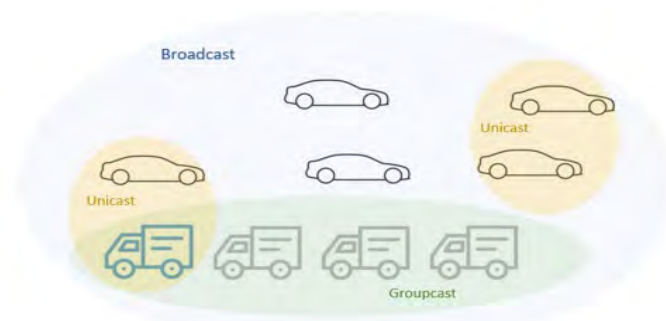
Εικόνα 20 Subcarrier spacing στο 5G-NR V2X

Οι κύριες τροποποιήσεις στο στρώμα MAC είναι:

- Τρόποι επικοινωνίας - Unicast, Broadcast, Groupcast:
 - ο Στη NR V2X τεχνολογία υποστηρίζονται και οι τρεις τρόποι μετάδοσης, η ευρεία εκπομπή (Broadcast), μονή εκπομπή (Unicast) και ομαδική εκπομπή (Groupcast). Στην ομαδική επικοινωνία, το όχημα μεταδίδει μηνύματα σε ένα υποσύνολο των οχημάτων που βρίσκονται στην κοντινή του εμβέλεια. Το LTE-V2X

υποστηρίζει μόνο Broadcast και Unicast (σε D2D επικοινωνία). Στην NR V2X, κάθε όχημα θα μπορεί να επικοινωνεί και με τους τρεις τρόπους ανάλογα την περίπτωση όπως φαίνεται στην Εικόνα 21. Στην περίπτωση του platooning, ο οδηγός αρχηγός, επικοινωνεί με Groupcast τα μηνύματα στα υπόλοιπα μέλη της ομάδας του, αλλά με Unicast όταν θέλει να επικοινωνήσει με ένα άλλο όχημα που δεν ανήκει στην ομάδα platooning.

- ο Η κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση των μηνυμάτων γίνεται στο φυσικό επίπεδο και συνήθως ο τρόπος αποστολής ενός μηνύματος (Unicast, Broadcast, Groupcast), καθορίζεται στο επίπεδο MAC. Στην NR τεχνολογία, οι τρόποι αποστολής ορίζονται στο φυσικό επίπεδο, ώστε οι παραλήπτες να γνωρίζουν τι είδους πακέτο είναι κι αν δεν προορίζεται γι' αυτούς να μην αποκωδικοποιήσουν ολόκληρο το μήνυμα. [34]



Εικόνα 21 Τρόποι επικοινωνίας 5G-NR: Broadcast. Unicast.

- Κατανομή Mini-Slot and Multi-Slot:
 - ο Η τεχνολογία, επιτρέπει ευέλικτο μέγεθος χρονοσχισμών (slots) για μετάδοση γιατί το μέγεθος των πακέτων μπορεί να ποικίλλει (λίγα OFDM σύμβολα) επομένως η χρήση ενός καθορισμένου μεγέθους (το LTE-V2X ορίζει μέγεθος 14 σύμβολα) είναι αναποτελεσματική. Τα mini slots δεν έχουν σταθερό χρόνο έναρξης και λήξης. Στην περίπτωση των μεγάλων πακέτων, μπορούν να ενωθούν πολλαπλά slots για την καλύτερη αξιοποίηση του καναλιού.
- Adaptive Sensing Window (Προσαρμοσμένα χρονικά παράθυρα Sensing):

- ο Στο LTE-V2X τα οχήματα παρακολουθούν συγκεκριμένο αριθμό subframes και μετρούν τα RSRP και S-RSSI για όλα τα subchannels. Το διάστημα αυτό ονομάζεται Sensing Window και είναι σταθερό. Αυτό έχει το μειονέκτημα, σε ένα σενάριο όπου τα αυτοκίνητα κινούνται πολύ γρήγορα, οι πληροφορίες που συλλέγονται παύουν να ισχύουν πολύ σύντομα. Το NR V2X, λύνει το πρόβλημα αυτό, με τον ορισμό ενός Sensing window που προσαρμόζεται. Επιπλέον, το NR V2X προτείνει να μην αξιολογείται η τιμή του RSSI, κανόνας έτσι την κατανομή των πόρων ταχύτερη.

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τις κύριες διαφορές μεταξύ του C-V2X (LTE) και του 5G NR V2X.

Πίνακας 4 Διαφορές μεταξύ C-V2X (LTE) και 5G NR V2X

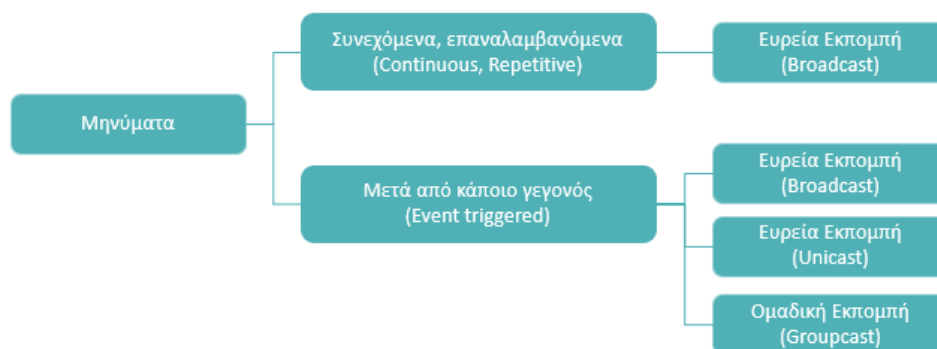
Τεχνικά Χαρακτηριστικά	C-V2X	5G NR V2X
Ζώνη Συχνότητας	5.9MHz	5.9MHz/ 60GHz (mmWave)
Κωδικοποίηση καναλιού	Turbo (data) Convolution code (control)	LDPC (data) Polar code (control)
Διαμόρφωση	Rel. 14: QPSK, 16-QAM Rel.15: 64-QAM	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Διάστημα υποφέρουσας OFDM (subcarrier spacing)	15kHz	Sub-6GHz:15kHz, 30kHz, 60kHz mmWave: 60kHz, 120kHz
Κυματομορφή	SC-FDMA	OFDM
Κανάλι επανατροφοδότησης (Feedback channel)	Δεν υποστηρίζεται	PSFCH
Πολυπλεξία δεδομένων ελέγχου	FDM	TDM
DMRS	4 σε κάθε subframe	Ευέλικτο
Αναμετάδοση	Τυφλή	HARQ
Διάστημα χρονοπρογραμματισμού	1 subframe	Slot, mini slot, multi slot
Διόρθωση λαθών	Κομμάτι του πακέτου δεδομένων	Ξεχωριστό πακέτο
Λειτουργίες Sidelink	Mode 3, 4	Mode 1, 2
Τρόποι επικοινωνίας	Broadcast	Unicast, Broadcast, Groupcast
Μηχανισμός για γρήγορη κατανομή καναλιού Sidelink	Όχι	Ναι
Χρονικό Παράθυρο Sensing	Σταθερό	Ευέλικτο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Μηνύματα και Εφαρμογές V2X

(3.1) V2X μηνύματα

Στο στρώμα των Facilities (Εικόνα 7, [20]) ορίζονται τα V2X μηνύματα για τις εφαρμογές της οχηματικής επικοινωνίας. Το στρώμα αυτό είναι ανάμεσα στο στρώμα των Εφαρμογών και του Δικτύου/Μεταφορών στη Στοιβα Πρωτοκόλλου. Παρέχει εξυπηρετήσεις στα ανώτερα στρώματα και αλληλοεπιδρά με τους μηχανισμούς ασφάλειας και διαχείρισης. Τα πρωτόκολλα στο επίπεδο αυτό, ορίζουν συγκεκριμένες λειτουργίες για τις διάφορες εφαρμογές.

Οι αρμόδιοι οργανισμοί στην Ευρώπη και στην Αμερική έχουν ορίσει διαφορετικές ομάδες για τα V2X μηνύματα που αφορούν στην ασφάλεια της οχηματικής επικοινωνίας. Επιπλέον, τα μηνύματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, αυτά που στέλνονται περιοδικά σε όλα τα οχήματα ώστε να ενημερώνονται για την κατάσταση του δικτύου κι αυτά που στέλνονται είτε σε όλα είτε σε υποσύνολο των οχημάτων, όταν έχει προκληθεί κάποιο γεγονός (Εικόνα 22).



Εικόνα 22 Κατηγορίες V2X μηνυμάτων

Ευρώπη

Στην Ευρώπη το ETSI έχει ορίσει για τις εφαρμογές οχηματικής ασφάλειας, δύο βασικές ομάδες οι οποίες εξυπηρετούν διαφορετικό σκοπό:

- Cooperative Awareness Message (CAM): ETSI EN 302 637-2
- Decentralized Environmental Notification Message (DENM): ETSI EN 302 637-3

Τα μηνύματα CAM (Συνεργατικό Μήνυμα Ενημερότητας) και DENM (Αποκεντρωμένο Περιβαλλοντικό Μήνυμα) είναι τα κύρια μηνύματα ασφάλειας στην Ευρώπη και πρέπει να υποστηρίζονται από την πρώτη φάση υλοποίησης της V2X τεχνολογίας (Day 1). Είναι μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ εφοδιασμένων με V2X τεχνολογία ITS σταθμών (π.χ. αυτοκίνητα, RSUs) [45]

Όλοι οι σταθμοί θα πρέπει να μπορούν να παράγουν, να στέλνουν και να λαμβάνουν μηνύματα. Με αυτό το τρόπο ενημερώνονται όλοι και δημιουργείται μια επίγνωση όλων προς όλους ώστε να επιτευχθεί μία συνεργασία μεταξύ των οχημάτων που χρησιμοποιούν το ITS δίκτυο.

- **CAM**

- ο Τα μηνύματα CAM είναι περιοδικά μηνύματα που αποστέλλονται από ένα σταθμό (όχημα) σε κοντινά οχήματα (one hop). Περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων πληροφορίες για την παρουσία, ταχύτητα, θερμοκρασία, τοποθεσία και την κατεύθυνση του οχήματος που τα μεταδίδει [46]. Οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη πολλών ITS εφαρμογών. Οι αποδέκτες των CAM μηνυμάτων αναλύουν τις πληροφορίες που έλαβαν (η διαδικασία αυτή γίνεται στο στρώμα Εφαρμογών), συγκρίνουν τη δική τους κατάσταση με τη πληροφορία αυτή κι έτσι μπορούν και προβλέπουν τυχόν κινδύνους (π.χ. πιθανή σύγκρουση).
- ο Περιπτώσεις τέτοιων μηνυμάτων αποτελεί η προειδοποίηση για όχημα που κινείται αργά στη περιοχή ή η παρουσία οχήματος έκτακτης ανάγκης. [47]

- **DENM**

- ο Τα μηνύματα DENM ενεργοποιούνται από κάποιο γεγονός, είναι ασύγχρονα και όχι περιοδικά. Περιέχουν πληροφορίες σχετικά με κινδύνους στο οδικό δίκτυο και προβλήματα στην κίνηση στους δρόμους και χρησιμοποιούνται κυρίως από την εφαρμογή για Συνεργατική προειδοποίηση Κινδύνων Οδικού δικτύου (Cooperative Road hazard Warning, RHW)[48]. Η διαχείριση των

μηνυμάτων DENM εξαρτάται από το αν το όχημα που το αποστέλλει είναι ο πρώτος αποστολέας του μηνύματος ή αν είναι ένα όχημα προωθητής (έχει λάβει το μήνυμα από άλλο σταθμό και το προωθεί στους κοντινούς σταθμούς/οχήματα – multi hop). Στη πρώτη περίπτωση ένα τέτοιο μήνυμα θα μπορούσε να είναι ένα απότομο φρενάρισμα του οδηγού. Τότε, ο αποστολέας του μηνύματος τερματίζει και τη μετάδοσή του. Στη δεύτερη περίπτωση, θα μπορούσε να είναι ένα μήνυμα για ισχυρό άνεμο στη περιοχή. Στη περίπτωση αυτή, το μήνυμα θα συνεχίσει να μεταδίδεται προς και από όλα τα οχήματα στη συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, ας έχει απομακρυνθεί το όχημα που έστειλε το πρώτο μήνυμα. Το μήνυμα θα τερματιστεί από κάποιο άλλο όχημα του συστήματος όταν διαπιστωθεί πως δεν υπάρχει πλέον ο συγκεκριμένος κίνδυνος.

- ο Περιπτώσεις DENM μηνυμάτων μεταξύ άλλων αποτελούν η οδήγηση σε λάθος κατεύθυνση, κατασκευαστικά έργα στο οδόστρωμα, ακραίες καιρικές συνθήκες, προβλήματα ορατότητας κ.α.

Υπάρχουν ακόμη τα παρακάτω μηνύματα που έχουν οριστεί για την Ευρώπη από το CEN TC 278 [49] σε συνεργασία με το ISO TC 204, τα οποία όμως υπάρχει η ευελιξία να υποστηριχθούν σε μελλοντικές φάσεις υλοποίησης της τεχνολογίας V2X (Day 2). Κυρίως αναφέρονται σε V2I και I2V επικοινωνία:

- SPATEM (Signal Phase and Timing Message)
 - ο Παρέχει δυναμικές πληροφορίες σχετικές με τη σηματοδότηση μιας διασταύρωσης. Τέτοιες πληροφορίες μπορεί να είναι οι ενδείξεις φωτεινού σηματοδότη στις διασταυρώσεις, μελλοντικές προβλέψεις για την κατάσταση των φαναριών, προτεινόμενη ταχύτητα καθώς κι αν είναι ενεργό ένα αίτημα έγκρισης προτεραιότητας.
 - ο SRM (Signal Request Message)

- Μήνυμα που αποστέλλεται από ένα OBU σε RSU και ζητάει προτεραιότητα για μία ή περισσότερες διασταυρώσεις με (φωτεινούς) σηματοδότες. [50]
Παράδειγμα θα μπορούσε να είναι ένα όχημα που πλησιάζει δύο φανάρια σε περιοχή κάλυψης V2X τεχνολογίας, και ειδοποιεί μέσω του μηνύματος αυτού την εκτιμώμενη ώρα άφιξης. Το RSU λαμβάνει το μήνυμα, το επεξεργάζεται και το αποστέλλει στον εξυπηρετητή αιτήσεων προτεραιοτήτων (Priority Request Server), που με τη σειρά του το αποστέλλει στον Συντονιστή (Coordinator) ώστε να δώσει την προτεραιότητα του σήματος που ζητήθηκε.
- ο SSM (Signal Status Message)
 - Το μήνυμα αυτό αποστέλλεται από ένα RSU και λαμβάνεται από ένα όχημα OBU και περιλαμβάνει την κατάσταση του αιτήματος προτεραιότητας που έχει ληφθεί για μία ή περισσότερες σηματοδοτημένες διασταυρώσεις
- MAPEM (Map Data)
 - ο Παρέχει πληροφορίες για την τοπολογία του οδικού δικτύου
- CPM (Collective Perception)
 - ο Το μήνυμα αυτό μεταδίδει δεδομένα σχετικά με τοπικές καταστάσεις όπως μη συνεργάσιμοι συμμετέχοντες στη κυκλοφορία, εμπόδια κλπ. Το CP θεωρείται στην αυτοκινητοβιομηχανία ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που θα βοηθήσει στην συνεργατική αυτόματη οδήγηση.
- IVI (In-vehicle information)
 - ο Το μήνυμα αυτό είναι ένα I2V μήνυμα (Infrastructure to Vehicle) το οποίο περιέχει πληροφορίες σχετικές με τις υπηρεσίες κυκλοφορίας που απαιτούνται για την οδική ασφάλεια και την αποδοτικότητα της κυκλοφορίας.
- MCM (Maneuver Coordination Message)

- ο Το μήνυμα αυτό είναι στα πρώιμα στάδια προτυποποίησης και αναφέρεται στο συντονισμό των ελιγμών μεταξύ των ITS σταθμών.

Αμερική

Στην Αμερική, ο SAE (Society of Automotive Engineers), έχει ορίσει μία κύρια κατηγορία μηνυμάτων για την οχηματική ασφάλεια, την Basic Safety Message (BSM). [51]

- **BSM**

- ο Τα μηνύματα αυτά περιέχουν πληροφορίες όπως την τοποθεσία του οχήματος, την ταχύτητα, την κατεύθυνση, την επιτάχυνση. Ο παραλήπτης ενός τέτοιου μηνύματος, αφού επεξεργαστεί το μήνυμα (στο στρώμα Εφαρμογών) μπορεί να προσδιορίσει αν υπάρχει πιθανός κίνδυνος (π.χ. σύγκρουση) και ειδοποιεί σχετικά τον οδηγό μέσω HMI (Human Machine Interface – Διεπαφή ανθρώπου υπολογιστή).
- ο Τα BSM μηνύματα ουσιαστικά είναι τα Ευρωπαϊκώς ορισμένα CAM/DENM μηνύματα, υποστηρίζουν δηλαδή τις ίδιες λειτουργίες και έχουν τις ίδιες εφαρμογές.

Έχουν επίσης οριστεί τα παρακάτω μηνύματα:

- EVA (Emergency Vehicle Alert)
 - ο Τα μηνύματα αυτά προειδοποιούν τους οδηγούς πως πλησιάζουν ή βρίσκονται στην περιοχή οχήματα έκτακτης ανάγκης
- SPaT/MAP (ίδια με τα αντίστοιχα Ευρωπαϊκά)
- TIM (Traveler Information)
 - ο Τα μηνύματα αυτά περιέχουν πληροφορίες για συνθήκες στην κίνηση και ενημερώνουν τους οδηγούς για κατασκευαστικά έργα στο οδικό δίκτυο, ατυχήματα στην περιοχή ή άλλες καταστάσεις ανάγκης
- CSW (Curve Speed Warning)

- ο Τα μηνύματα αυτά χρησιμοποιούνται για ενημέρωση των οχημάτων ότι πλησιάζει στροφή στην πορεία τους κι έτσι να ελαττώσουν ταχύτητα για την αποφυγή κάποιου ατυχήματος. Αποτελεί ένα ειδικό μήνυμα της κατηγορίας TIM

Ο παρακάτω πίνακας περιγράφει τη συσχέτιση V2X μηνυμάτων σε Αμερική και Ευρώπη.

Πίνακας 5 Συσχέτιση V2X μηνυμάτων σε Αμερική και Ευρώπη

ETSI ITS Message	SAE Message
Cooperative Awareness Message (CAM) / Decentralized Environment Notification Message (DENM)	Basic Safety Message (BSM)
DENM	Emergency Vehicle Alert (EVA)
Signal Phase & Timing (SPaT / MAP)	Ίδια με το Ευρωπαϊκό πρωτόκολλο
DENM	Traveller Information Message (TIM)
Δεν υποστηρίζεται	Curve Speed Warning (CSW - special TIM)

(3.2) Εφαρμογές V2X (Use Cases)

Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, ο τρόπος με τον οποίο γίνονται οι μετακινήσεις στο οδικό σύστημα πρέπει να εξελιχθεί και να προσαρμοστεί στους κανόνες που ορίζει η νέα πραγματικότητα. Όπως έχει παρουσιαστεί και στα προηγούμενα κεφάλαια, η χρήση οχηματικής επικοινωνίας V2X είναι ζωτικής σημασίας πλέον.

Οι εφαρμογές της τεχνολογίας αυτής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, αυτές που πρέπει να υποστηρίζονται από την πρώτη φάση της υλοποίησης και είναι οι πιο κρίσιμες (Day 1) και οι πιο προηγμένες (Advanced) που πρέπει να υποστηριχθούν σε μεταγενέστερες φάσεις. Οι Day 1 εφαρμογές υποστηρίζονται με την ανάπτυξη των V2X τεχνολογιών DSRC και C-V2X. Οι εφαρμογές αυτές έχουν συνήθως χαμηλότερες απαιτήσεις (συγκριτικά με τις προηγμένες εφαρμογές) ως προς την ταχύτητα και το μέγεθος μεταδιδόμενων δεδομένων. Είναι εφαρμογές που εστιάζουν κυρίως στην ασφάλεια του οδικού συστήματος, ανταλλάσσοντας μηνύματα ασφαλείας στο οχηματικό δίκτυο (Κεφ. 2.4).

Οι προηγμένες εφαρμογές στηρίζονται πάνω στις υλοποιήσεις των Day-1 εφαρμογών κι έχουν πιο αυστηρές απαιτήσεις σε αξιοπιστία, χρονοκαθυστέρηση και μεγέθους μετάδοσης δεδομένων. Απαιτούν πιο προηγμένα πρωτόκολλα (Κεφ. 2.3) και αναφέρονται σε εφαρμογές μεταξύ άλλων όπως αυτόνομη οδήγηση, platooning (τρόπος μαζικής οδήγησης οχημάτων, όπου το πρώτο όχημα λειτουργεί ως οδηγός), κοινή χρήση αισθητήρων (Sensor sharing), κ.α.

Εφαρμογές – Εφαρμογές Ασφάλειας (Safety Applications)

Ο κύριος στόχος των εφαρμογών ασφάλειας είναι να μειωθούν τα ατυχήματα και ως εκ τούτου το ποσοστό θνησιμότητας που οφείλεται σε αυτοκινητιστικά ατυχήματα. Οι εφαρμογές αυτές, λειτουργούν προληπτικά στέλνοντας σχετικές προειδοποιήσεις στους οδηγούς. Ακολουθούν οι εφαρμογές αυτές και οι περιπτώσεις που περιλαμβάνουν [8]:

1. Αποφυγή σύγκρουσης σε διασταύρωση (Intersection collision

Avoidance): Η αρχιτεκτονική DSRC ορίζει πως πρέπει να υπάρχει μια ασφαλής σύνδεση (secure link) μεταξύ των οχημάτων και των Road Side Units που βρίσκονται στις διασταυρώσεις, η οποία έχει γίνει εκ των προτέρων ώστε να παρέχονται νωρίς οι πληροφορίες για τυχόν ατυχήματα. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν:

- a) Προειδοποίηση για παραβίαση σηματοδότη (Traffic signal violation warning)
- b) Προειδοποίηση για παραβίαση σήματος υποχρεωτικής διακοπής πορείας (Stop sign violation warning)
- c) Βοήθεια για στροφή αριστερά (Left turn assistance)
- d) Βοήθεια για κίνηση σε σηματοδότη υποχρεωτικής διακοπής πορείας (Stop sign movement assistance)
- e) Προειδοποίηση σύγκρουσης σε διασταύρωση (Intersection collision warning)
- f) Προειδοποίηση για ατυχήματα όταν η ορατότητα είναι χαμηλή (Blind merge warning)
- g) Πληροφορίες για παρουσία πεζών (Pedestrian crossing information at designated intersection)

2. **Εφαρμογές σχετικές με την δημόσια ασφάλεια (Public safety related applications):** Στην «Ευφυή» μετακίνηση, η υποστήριξη της δημόσιας ασφάλειας είναι απαραίτητη. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν περιπτώσεις όπως:

- a) *Approaching emergency vehicle warning:* Η προειδοποίηση πως βρίσκεται στο δρόμο όχημα έκτακτης ανάγκης, θεωρεί δεδομένο πως η σημαντικότητα ενός τέτοιου οχήματος αναγνωρίζεται από όλους τους οδηγούς. Οι πληροφορίες που μεταδίδονται προς όλους τους οδηγούς είναι η τοποθεσία, συντεταγμένες του οχήματος έκτακτης ανάγκης, η ταχύτητά του, η λωρίδα στην οποία πορεύεται όπως επίσης και η κατεύθυνσή του. Έχοντας αυτές τις πληροφορίες ο οδηγός του κάθε οχήματος, μπορεί να κάνει τις απαραίτητες τροποποιήσεις στη πορεία του ώστε να δώσει προτεραιότητα στο όχημα που πλησιάζει. Έχοντας αυτές τις πληροφορίες σχετικά νωρίς, δε θα δημιουργηθεί συνωστισμός στις λωρίδες τελευταία στιγμή από τους οδηγούς που αλλάζουν πορεία μόλις το όχημα έκτακτης ανάγκης βρεθεί πολύ κοντά τους – στο οπτικό τους πεδίο (όπως συμβαίνει σήμερα σε αντίστοιχες περιπτώσεις).
- b) *Emergency vehicle signal preemption:* Στην περίπτωση αυτή, λόγω της παρουσίας ενός οχήματος έκτακτης ανάγκης στο δρόμο, όλοι οι κοντινοί σηματοδότες θα αλλάξουν κατάσταση σε «πράσινο» ώστε να επιτρέψουν στα οχήματα αυτά να περάσουν χωρίς εμπόδια και χωρίς να δημιουργηθεί συνωστισμός στους κόμβους φωτεινής σηματοδότησης. Στη περίπτωση αυτή χρειάζεται η επικοινωνία V2I για να γίνουν broadcast τα σχετικά μηνύματα σε όλους τους φωτεινούς σηματοδότες.
- c) *SOS services:* Οι περιπτώσεις αυτές περιγράφουν καταστάσεις όπου απειλείται ανθρώπινη ζωή. Σε περιπτώσεις όπου έχει ενεργοποιηθεί ο αερόσακος, το όχημα αυτόματα θα στείλει μήνυμα προς τα άλλα οχήματα αλλά και την πλησιέστερη υποδομή στέλνοντας πληροφορίες για την τρέχουσα τοποθεσία του, ήχο και εικόνες για την άμεση παροχή βοήθειας.

d) *Post-crash warning*: Όταν ένα όχημα παρουσιάσει κάποιο σφάλμα είτε μηχανικό, είτε μετά από κάποιο ατύχημα και είναι σταματημένο στο δρόμο, τότε θα στείλει μήνυμα με V2V ή V2I στα κοντινά οχήματα, να τα ενημερώσει για την θέση του ώστε να αποφευχθεί κάποια σύγκρουση.

3. Πληροφορίες από άλλα οχήματα (Information from other vehicles): Οι πληροφορίες που ανταλλάσσουν τα οχήματα μεταξύ τους

και με τις υποδομές, βοηθούν στην ενημέρωση των οδηγών για καταστάσεις που πιθανόν να οδηγούσαν σε κάποιο ατύχημα. Τέτοιες περιπτώσεις είναι το απότομο φρενάρισμα ενός οχήματος το οποίο μπορεί να μην είναι ορατό από όλα τα κοντινά οχήματα (emergency electronic brake lights), ο κίνδυνος για ατύχημα με χτύπημα στο πίσω μέρος του οχήματος (forward collision warning), ενημέρωση του οδηγού για την παρουσία οχήματος στο τυφλό σημείο (blind spot warning position), ενημέρωση του οδηγού για την αλλαγή λωρίδας ενός άλλου οχήματος (lane change warning) που με βάση τις πληροφορίες των συντεταγμένων των δύο οχημάτων, την κατεύθυνση και την ταχύτητα τους μπορεί να αποφύγει πιθανή σύγκρουση. Επιπλέον, οι προειδοποιήσεις αυτές καλύπτουν περιπτώσεις οχημάτων που εισέρχονται σε δρόμο ταχείας κυκλοφορίας (highway merge assistant), πιθανά ατυχήματα μεταξύ οχημάτων σε δρόμο ταχείας κυκλοφορίας και τρένα (highway/rail collision warning), ακραίων καιρικών φαινομένων (visibility enhancer), και συνεργατικής οδήγησης οχημάτων σε δρόμο ταχείας κυκλοφορίας (platooning). Με το platooning, βελτιώνεται η ροή της κυκλοφορίας και μειώνεται η αλληλεπίδραση του οχήματος με τον άνθρωπο ελαχιστοποιώντας έτσι λάθη που οφείλονται στον ανθρώπινο παράγοντα.

4. Σήματα (Sign extension): Οι εφαρμογές αυτές ενημερώνουν τους οδηγούς πως πρέπει να δίνουν σημασία στα σήματα (signs) που υπάρχουν στο δρόμο και στην ουσία τα RSUs στέλνουν ειδοποιήσεις (alerts) αντίστοιχες με τη σηματοδότηση που υπάρχει στο οδικό δίκτυο σε

περίπτωση που κάποιος οδηγός δεν την έχει παρατηρήσει. Για παράδειγμα όταν το όχημα πλησιάζει κατοικημένη περιοχή, ένα σχολείο ή ένα νοσοκομείο (in vehicle signage). Άλλες περιπτώσεις είναι όταν το όχημα πλησιάζει σε απότομη στροφή (Curve speed warning), όταν γίνονται έργα στο οδικό δίκτυο (Work zone warning), όταν κοντινά οχήματα έχουν λάθος πορεία (Wrong way driver warning), ειδοποιήσεις σχετικά με χώρους στάθμευσης (low parking structure warning), το ύψος παρακείμενης γέφυρας, ώστε να ξέρει ο οδηγός αν πρέπει να περάσει από κάτω ή να αλλάξει πορεία (low bridge warning). Στην ίδια κατηγορία επίσης, εντάσσεται και η ειδοποίηση AMBER (America's Missing: Broadcast Emergency Response) η οποία είναι μια ειδοποίηση για απαγωγές παιδιών. Όταν ο οδηγός ενός οχήματος λάβει ένα τέτοιο μήνυμα από την υποδομή (I2V) γνωρίζει πως στην κοντινή περιοχή υπάρχει ύποπτο όχημα. Η υποδομή γνωρίζει και στέλνει το μήνυμα σε όλα τα οχήματα πλην του υπόπτου.

5. Διαγνωστικά και συντήρηση οχήματος (Vehicle diagnostics and maintenance): Οι εφαρμογές αυτές ειδοποιούν τους οδηγούς για την περιοδική συντήρηση των οχημάτων όπως επίσης και για κοντινά συνεργεία στις περιπτώσεις που τα διαγνωστικά του οχήματος που αποστέλλονται στα RSUs προειδοποιούν για κάποια βλάβη.

Επιπλέον, υπάρχει η οικογένεια των εφαρμογών που σχετίζονται με τη διαχείριση της κίνησης. Αν και λύσεις για κάποιες από τις εφαρμογές αυτές υπάρχουν ήδη, αξίζει να σημειωθεί πως θα μπορούσαν να υλοποιηθούν και με V2X τεχνολογίες. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι ψηφιακοί χάρτες οδικού δικτύου (Digital Map Downloading) και τα διόδια (Electronic toll collection). [8]

Οι V2X τεχνολογίες αναπτύχθηκαν με σκοπό να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον, στο Infotainment (πληροφόρηση και διασκέδαση) και στην Υγεία. Μέχρι σήμερα όμως οι οργανισμοί εστιάζουν στην ασφάλεια των μετακινήσεων. Ένας βασικός λόγος είναι πως έχει γίνει αρκετή πρόοδος στους τομείς υγείας και infotainment και υπάρχουν λύσεις που δουλεύουν με ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες, όπως το συμβατικό δίκτυο LTE/4G, WiFi, Bluetooth κ.α.

(3.2) Ασφάλεια (Security) στη V2X επικοινωνία

Η πρόοδος που έχει κάνει τα τελευταία χρόνια ο τομέας V2X δικτύων, όπως είναι αναμενόμενο, έχει τραβήξει το ενδιαφέρον των κακόβουλων χρηστών (attackers). Οι επιθέσεις στα V2X δίκτυα τα καθιστά ευάλωτα σε θέματα ασφαλείας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να τίθεται σε κίνδυνο η ασφάλεια (safety) και η ακεραιότητα των οχημάτων, οδηγών, πεζών και γενικά των χρηστών του οδικού δικτύου. [52] Για το λόγο αυτό, το θέμα του Security πρέπει να μελετηθεί ταυτόχρονα με την ανάπτυξη των χαρακτηριστικών των V2X πρωτοκόλλων.

(3.2.1) Προδιαγραφές Ασφάλειας (Security Requirements)

Οι προδιαγραφές ασφαλείας αναφέρονται σε βασικούς τομείς που πρέπει να μελετηθούν πριν την υλοποίηση και τη χρήση των V2X επικοινωνιών στο οδικό σύστημα. Αναφέρονται σε θέματα γνησιότητας (authentication-authenticity), εμπιστευτικότητας (confidentiality) και ακεραιότητας δεδομένων (data integrity). Είναι στην ουσία κριτήρια με τα οποία μπορεί να μετρηθεί το πόσο ασφαλές είναι ένα δίκτυο. [8], [53]

1. **Identification, Authentication/Authenticity, Integrity (Ταυτοποίηση - Αυθεντικοποίηση, Ακεραιότητα):** Είναι σημαντικά τα οχήματα τα οποία είναι συνδεδεμένα σε ένα οχηματικό δίκτυο, να είναι «αυθεντικά». Αυτό σημαίνει πως πρέπει να είναι νόμιμα, να διαθέτουν μια νόμιμη ταυτότητα (ID).
2. **Confidentiality, Privacy (Εμπιστευτικότητα, Ιδιωτικότητα):** Τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ των οχημάτων περιέχουν ευαίσθητες πληροφορίες όπως ταχύτητα, τοποθεσία και κατεύθυνση. Αυτή η πληροφορία δε θα πρέπει να προσπελαστεί από τους κακόβουλους χρήστες (attackers).
3. **Availability, real time guarantees (Διαθεσιμότητα, εγγυήσεις σε πραγματικό χρόνο):** Οι πληροφορίες μέσω των μηνυμάτων θα πρέπει να φτάσει στους χρήστες του δικτύου στο σωστό χρόνο. Τυχόν καθυστερήσεις μπορεί να κάνουν τις πληροφορίες αυτές μη χρήσιμες πλέον από τους αποδέκτες. Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί, όταν στο δίκτυο εισβάλλουν κακόβουλοι χρήστες και στέλνουν ψεύτικες αιτήσεις

εξυπηρέτησης. Ως αποτέλεσμα, σε ένα πεπερασμένου εύρους και πόρων δίκτυο, θα δημιουργηθεί συνωστισμός στα διάφορα αιτήματα και θα είναι δύσκολη η αποκωδικοποίηση των μηνυμάτων και η εξυπηρέτηση στο σωστό χρόνο.

4. **Non-repudiation, Accountability (Μη απόρριψη, υπευθυνότητα):** Τα οχήματα που είναι συνδεδεμένα στο V2X δίκτυο, θα πρέπει να είναι συνεχώς συγχρονισμένα. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο συγχρονισμός αυτός γίνεται είτε μέσω ενός κεντρικού σταθμού βάσης είτε μεταξύ των ίδιων των οχημάτων. Στα μη συγχρονισμένα οχήματα, θα πρέπει να μη δίνεται η άδεια να μεταδώσουν μηνύματα και ως αποτέλεσμα να θέσουν σε κίνδυνο την απόδοση του συστήματος.
5. **Data verification (Επαλήθευση δεδομένων):** Θα πρέπει τα μηνύματα που αποστέλλονται να περνούν από μια διαδικασία επαλήθευσης διότι μπορεί να έχουν κακοβούλως αλλοιωθεί.
6. **Anti-jamming (Προστασία από παρεμβολές):** Το V2X σύστημα θα πρέπει να έχει τρόπο να αντιστέκεται στις παρεμβολές (jamming) που εν δυνάμει θα δεχτεί από κακόβουλα οχήματα.
7. **Access control (Ελεγχος πρόσβασης):** Κάθε όχημα/στοιχείο του V2X δικτύου έχει συγκεκριμένα δικαιώματα. Θα πρέπει να υπάρχει τρόπος να επαληθεύεται ότι οι λειτουργίες του κάθε οχήματος/στοιχείου του δικτύου συνάδει με τα δικαιώματα που έχει.
8. **Scalability (Επεκτασιμότητα):** Ένα δίκτυο V2X προσαρμόζεται δυναμικά ανάλογα με τον αριθμό των οχημάτων που εισέρχονται ή εξέρχονται από το δίκτυο. Η προσαρμογή αυτή του δικτύου θα πρέπει να γίνεται με ομαλό τρόπο χωρίς να διακόπτεται η ορθή λειτουργία του.

(3.2.2) Είδη επίθεσης και απειλών (Attack types - threats)

Για να ενισχυθεί ο μηχανισμός ασφάλειας (security), είναι σημαντικό να κατανοηθούν οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να επιτεθεί ή να απειλήσει κάποιος την ακεραιότητα του δικτύου. Στη συνέχεια (Πίνακας 6) παρουσιάζονται οι πιο βασικές επιθέσεις [54]:

Πίνακας 6 Είδη επίθεσης και απειλών V2X

Επίθεση/Απειλή	Ρόλος του attacker	Υπηρεσία που επηρεάζεται
Παραποίηση μηνυμάτων (Message spoofing)	Παρέχει λάθος πληροφορίες στα μηνύματα (πχ. τοποθεσία)	Authentication, Availability, Integrity
Υποκλοπή (Eavesdropping)	Ακούει τις επικοινωνίες σε ένα δίκτυο και συλλέγει χρήσιμες πληροφορίες	Authentication, Privacy
Απόρριψη (Repudiation)	Κάποιος κόμβος αρνείται την επικοινωνία	Non-Repudiation
Sybil	Δημιουργεί πολλαπλά αυτοκίνητα με την ίδια ταυτότητα	Authentication, Availability
Denial of Service (DoS) Άρνηση εξυπηρέτησης	Στοχοποιεί τη διαθεσιμότητα του δικτύου. Παράδειγμα τέτοιας επίθεσης είναι το flooding, όπου ο attacker στέλνει μεγάλο όγκο πληροφορίας στο δίκτυο, την οποία δε μπορεί να διαχειριστεί οπότε διαταράσσεται η ορθή λειτουργία του. Ως αποτέλεσμα, οι νόμιμοι χρήστες δε μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις υπηρεσίες του δικτύου.	Authentication, Availability
Malicious Code (Κακόβουλος κώδικας)	Μεταδίδει κακόβουλη πληροφορία με τη μορφή κώδικα. Παραδείγματα αποτελούν οι ιοί και τα Spywares.	Availability
Man in the Middle	Αναλαμβάνει τον έλεγχο της επικοινωνίας μεταξύ δύο επικοινωνούντων οχημάτων	Authentication, Confidentiality, Integrity, Non-Repudiation
Unauthorized Access (Μη αδειοδοτημένη πρόσβαση)	Αναγκαστική πρόσβαση σε υπηρεσίες δικτύου	Confidentiality, Privacy
Tampering Hardware (Παραποίηση υλικού)	Αποκτά πρόσβαση ή τοποθετεί ειδικά δεδομένα στο όχημα	Confidentiality, Privacy
Masquerade (Πλαστοπροσωπία)	Χρησιμοποιεί μια έγκυρη ταυτότητα ή μάσκα για την απόκρυψη του εαυτού του, προσποιείται πως είναι κάποιος άλλος	Authentication, Integrity, Non-Repudiation
Identity Revealing (Αποκάλυψη ταυτότητας)	Υπονομεύει τις προσωπικές πληροφορίες του ιδιοκτήτη	Authentication, Privacy
Location Tracking (Παρακολούθηση θέσης)	Παρακολουθεί τη θέση και τη διαδρομή που ακολουθείται από κάποιο όχημα	Privacy
Message tampering (Παραποίηση μηνυμάτων)	Τροποποιεί, μεταβάλλει, διαγράφει ή κατασκευάζει τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα	Authentication, Availability, Integrity, Non-Repudiation
Hidden Vehicle (Κρυμμένο όχημα)	Δημιουργεί ψευδή θέση των οχημάτων και προκαλεί ατυχήματα	Authentication, Integrity, Non-Repudiation

Οι V2X επικοινωνίες έχουν να αντιμετωπίσουν αρκετές προκλήσεις πριν την υλοποίηση και τη χρήση τους. Μερικές από τις προκλήσεις αυτές εξετάζονται στη συνέχεια:

- **Αποφυγή επιθέσεων:** Η V2X τεχνολογία θα πρέπει να έχει μηχανισμό αποφυγής των απειλών και των επιθέσεων. Υπάρχουν εφαρμογές που απαιτούν την αποστολή πληροφορίας όπως είναι η ταυτότητα ενός οχήματος (π.χ. MAC address), όπου σε κάθε περίπτωση η πληροφορία αυτή πρέπει να είναι προστατευμένη. Μια λύση θα μπορούσε να είναι η εφαρμογή ενός συστήματος PKI (Public Key Infrastructure), όπου κάθε μέλος του δικτύου έχει αποθηκευμένο ένα ιδιωτικό κλειδί (private key) και το οποίο χρησιμοποιεί μαζί με το Public key (γνωστό σε όλους) να (από)κρυπτογραφήσει τα μηνύματα που στέλνει/λαμβάνει. Με αυτό το τρόπο δε θα μπορεί ένας κακόβουλος χρήστης ο οποίος παρακολουθεί ένα συγκεκριμένο όχημα (track), να στέλνει ψευδή μηνύματα παράβασης των κανόνων του οδικού δικτύου, προσποιούμενος την ταυτότητα ενός οχήματος, κι έτσι να επιφέρει κυρώσεις σε ανυποψίαστους οδηγούς.
- **Σταθερότητα δικτύου:** Είναι σημαντικό τα δεδομένα τα οποία ανταλλάσσονται μεταξύ χρηστών και του δικτύου και αποθηκεύονται για κάποιο χρονικό διάστημα στο Cloud να είναι κρυπτογραφημένα για την διατήρηση της ασφάλειας του καναλιού επικοινωνίας δίκτυο/όχημα και της ιδιωτικότητας των χρηστών (privacy).
- **Ιδιωτικότητα χρηστών:** Υπάρχουν χρήστες που δεν επιθυμούν να αποκαλύπτουν πληροφορίες για την ταυτότητά τους. Τα V2X συστήματα θα πρέπει να κερδίσουν την εμπιστοσύνη των χρηστών και να διευθετήσουν το θέμα της ιδιωτικότητας. Είναι βέβαια παράδοξο το ότι όσο περισσότερο ασφαλές (secured) είναι ένα σύστημα, τόσο λιγότερη ιδιωτικότητα έχει. Λύσεις στο θέμα της ιδιωτικότητας που μελετώνται είναι η χρήση PKIs, ομαδική υπογραφή (group signing), η περιοδική αλλαγή των MAC ταυτοτήτων κ.α.
- **Διαχείριση κλειδιών:** Τα κλειδιά χρησιμοποιούνται στα κρυπτογραφικά συστήματα για την (από)κρυπτογραφία ευαίσθητης

πληροφορίας. Τα πρωτόκολλα V2X θα πρέπει να καλύπτουν το security και ως συνέπεια να διευθετήσουν θέματα που προκύπτουν από τη διαχείριση κλειδιών. Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, ένας τρόπος να υποστηριχθεί το security στα V2X πρωτόκολλα είναι η χρήση PKI. Στην περίπτωση αυτή, δημιουργούνται επιπλέον προκλήσεις και δυσκολίες, όπως η ανάκληση ύποπτων κλειδιών εξαιτίας παρουσίας κακόβουλων χρηστών μεταξύ των χρηστών του δικτύου.

- **Δυναμική Τοπολογία δικτύου:** Τα V2X δίκτυα είναι δυναμικά δίκτυα που σημαίνει πως η τοπολογία τους αλλάζει κάθε στιγμή ανάλογα με τα οχήματα που εισέρχονται και εξέρχονται από αυτό. [54] Η διαχείριση ενός τέτοιου δικτύου ταυτόχρονα με τους μηχανισμούς ασφάλειας (ανταλλαγή πιστοποιήσεων) είναι μια απαιτητική διαδικασία. Θα πρέπει να υπάρχουν μηχανισμοί που θα μπορούν να παρέχουν την απαραίτητη ασφάλεια σε ένα τέτοιο σύστημα.
- **Ετερογένεια συστημάτων:** Υπάρχει μια ετερογένεια στα V2X συστήματα που οφείλεται στους διαφορετικούς νόμους και κανονισμούς των διαφόρων κρατών στα οποία θα λειτουργεί το V2X, όσον αφορά τα θέματα Security και Privacy. Οι αρμόδιοι οργανισμοί θα πρέπει να ορίσουν μια κοινή γραμμή στα θέματα αυτά.
- **Χρονοκαθυστέρηση επικοινωνίας και Προτεραιότητα δεδομένων:** Ένα V2X δίκτυο έχει να διαχειριστεί έναν μεγάλο όγκο πληροφοριών, να τις αναλύσει και να καθορίσει ποιες πληροφορίες πρέπει να μεταδοθούν και σε ποιο χρόνο. Πρέπει να υπάρχουν μηχανισμοί που οι πληροφορίες και τα μηνύματα σχετιζόμενα με κρίσιμες καταστάσεις ασφάλειας (Security) θα πάρουν προτεραιότητα.

Ως αυτό το σημείο, έχει γίνει μια πλήρης περιγραφή των V2X τεχνολογιών. Έχουν αναφερθεί οι λόγοι που οδήγησαν στην ανάγκη για ανάπτυξη της οχηματικής επικοινωνίας, τα προβλήματα που έχει υποσχεθεί να λύσει και οι προκλήσεις που αντιμετωπίζει. Παρουσιάστηκαν οι δύο επικρατέστερες τεχνολογίες DSRC και C-V2X και οι βελτιωμένες τους εκδόσεις Νέας Γενιάς καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους τόσο σε φυσικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο στοίβας. Έχει γίνει

αναφορά στα είδη των V2X μηνυμάτων και τις εφαρμογές που καλύπτουν και εξετάστηκε το κομμάτι του Security, το ρόλο που παίζει, την κρισιμότητά του αλλά και τα προβλήματα που μπορεί να δημιουργήσει στην ανάπτυξη, την υλοποίηση και την εφαρμογή του V2X.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Σενάριο εργασίας στο MATLAB

(4.1) 5G-NR μια πιο λεπτομερής περιγραφή

Το 5G NR (New Radio) είναι το παγκόσμιο πρότυπο για μια ενοποιημένη, πιο ικανή ασύρματη διεπαφή του 5G. Καθορίζει τη διεπαφή αέρα για τα δίκτυα 5G, καλύπτοντας τόσο το δίκτυο ραδιοπρόσβασης (RAN) όσο και το δίκτυο πυρήνα. Το πρότυπο αναπτύσσεται από το έργο σύμπραξης 3ης γενιάς (3GPP).

Στο πλαίσιο της ασύρματης επικοινωνίας, η παραγωγή κυματομορφής αναφέρεται στη δημιουργία των ραδιοσημάτων που μεταφέρουν πληροφορίες μεταξύ πομπού και δέκτη. Για το 5G, αυτό περιλαμβάνει τη δημιουργία σύνθετων κυματομορφών που μπορούν να υποστηρίξουν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, χαμηλή καθυστέρηση και ποικίλες περιπτώσεις χρήσης.

Χωρίς συγκεκριμένες λεπτομέρειες σχετικά με το "5G NR-TM" και το "FRC" στο δικό σας πλαίσιο, είναι δύσκολο να παράσχουμε ακριβείς πληροφορίες. Ωστόσο, παραθέτουμε ορισμένες γενικές πτυχές που σχετίζονται με τη δημιουργία κυματομορφών στο 5G NR:

Το 5G NR χρησιμοποιεί ένα εύρος κυματομορφών, συμπεριλαμβανομένων διαφόρων σχημάτων διαμόρφωσης (π.χ. QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM) και αριθμολογιών (επιλογές αποστάσεων υποφερόντων) για την προσαρμογή σε διαφορετικά σενάρια ανάπτυξης και ζώνες συχνотήτων.

Το 5G NR υποστηρίζει πολλαπλές αριθμολογίες, επιτρέποντας την προσαρμογή της κυματομορφής σε διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης. Οι διαφορετικές αριθμολογίες έχουν διαφορετικές αποστάσεις υποφερόντων, επιτρέποντας στο σύστημα να είναι ευέλικτο όσον αφορά το εύρος ζώνης και την καθυστέρηση.

Το 5G NR εισάγει μια ευέλικτη δομή πλαισίου, επιτρέποντας την προσαρμογή της διάρκειας του πλαισίου και των μορφών των σχισμών. Αυτή η ευελιξία είναι ζωτικής σημασίας για την υποδοχή ποικίλων υπηρεσιών και εφαρμογών με διαφορετικές απαιτήσεις καθυστέρησης και ρυθμού μετάδοσης.

Το 5G NR ενσωματώνει προηγμένες τεχνολογίες κεραιών, όπως η μαζική MIMO (πολλαπλή είσοδος, πολλαπλή έξοδος) και η διαμόρφωση δέσμης. Αυτές οι

τεχνολογίες επηρεάζουν τα χωρικά χαρακτηριστικά της κυματομορφής, βελτιώνοντας την κάλυψη, τη χωρητικότητα και τη φασματική απόδοση.

Οι επικοινωνίες οχημάτων έχουν ειδικές απαιτήσεις και προκλήσεις λόγω της δυναμικής φύσης της κινητικότητας των οχημάτων, των ποικίλων περιβαλλοντικών συνθηκών και της ανάγκης για αξιόπιστη επικοινωνία με χαμηλή καθυστέρηση. Οι απαιτήσεις ασύρματου καναλιού για τις επικοινωνίες οχημάτων επηρεάζονται από παράγοντες όπως οι εφαρμογές ασφαλείας, οι υπηρεσίες ενημέρωσης και ψυχαγωγίας, η διαχείριση της κυκλοφορίας και άλλα. Ακολουθούν ορισμένες βασικές εκτιμήσεις:

Χαμηλή καθυστέρηση:

Οι εφαρμογές ασφάλειας οχημάτων, όπως τα συστήματα αποφυγής συγκρούσεων, απαιτούν επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης. Το ασύρματο κανάλι θα πρέπει να παρέχει γρήγορη και αξιόπιστη μετάδοση κρίσιμων πληροφοριών, ώστε να είναι δυνατή η ταχεία λήψη αποφάσεων.

Υψηλή αξιοπιστία:

Οι κρίσιμες για την ασφάλεια εφαρμογές απαιτούν υψηλή αξιοπιστία, ώστε να διασφαλίζεται ότι τα μηνύματα λαμβάνονται με ακρίβεια και λαμβάνονται υπόψη. Το ασύρματο κανάλι θα πρέπει να ελαχιστοποιεί τις απώλειες πακέτων και τα σφάλματα, ακόμη και σε δύσκολα περιβάλλοντα.

Υψηλή απόδοση:

Εφαρμογές όπως η διαχείριση της κυκλοφορίας και οι υπηρεσίες ενημέρωσης και ψυχαγωγίας επωφελούνται από την υψηλή απόδοση για την υποστήριξη της ανταλλαγής μεγάλου όγκου δεδομένων. Τα κανάλια υψηλής απόδοσης είναι απαραίτητα για την παροχή ενημερώσεων κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο, περιεχομένου πολυμέσων και άλλων πληροφοριών.

Ανθεκτικότητα στην εξασθένιση:

Τα κανάλια οχημάτων εμφανίζουν συχνά εξασθένιση λόγω διάδοσης πολλαπλών διαδρομών, ιδίως σε αστικά περιβάλλοντα. Το ασύρματο κανάλι θα πρέπει να είναι ανθεκτικό στην εξασθένιση και τεχνικές όπως η λήψη ποικιλομορφίας ή η διαμόρφωση δέσμης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον μετριασμό των επιπτώσεών της.

Αντιστάθμιση μετατόπισης Doppler:

Τα κινούμενα οχήματα παρουσιάζουν μετατοπίσεις Doppler, οι οποίες επηρεάζουν τη συχνότητα φέροντος των ασύρματων σημάτων. Τα μοντέλα καναλιών και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις μετατοπίσεις Doppler για να διατηρείται ακριβής συγχρονισμός συχνότητας.

Μεταβαλλόμενη πυκνότητα οχημάτων:

Στις αστικές περιοχές, η πυκνότητα των οχημάτων μπορεί να ποικίλλει σημαντικά. Το ασύρματο κανάλι θα πρέπει να είναι σε θέση να διαχειρίζεται ποικίλους αριθμούς συνδεδεμένων οχημάτων και να προσαρμόζεται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου.

Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση:

Τα προσαρμοστικά οχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης βοηθούν στη βελτιστοποίηση της μετάδοσης δεδομένων με βάση τις τρέχουσες συνθήκες του καναλιού. Το ασύρματο κανάλι θα πρέπει να υποστηρίζει αυτές τις προσαρμοστικές τεχνικές για τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας.

Ασφάλεια και προστασία της ιδιωτικής ζωής:

Οι επικοινωνίες οχημάτων συχνά περιλαμβάνουν την ανταλλαγή ευαίσθητων πληροφοριών. Το ασύρματο κανάλι πρέπει να παρέχει ισχυρούς μηχανισμούς ασφαλείας για την προστασία από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση, υποκλοπή και άλλες απειλές ασφαλείας.

Επεκτασιμότητα:

Το ασύρματο κανάλι πρέπει να είναι κλιμακούμενο για να μπορεί να εξυπηρετεί τον αυξανόμενο αριθμό συνδεδεμένων οχημάτων. Η επεκτασιμότητα εξασφαλίζει ότι η υποδομή επικοινωνίας μπορεί να διαχειριστεί την αύξηση του αριθμού των συσκευών στο δίκτυο.

Συνύπαρξη με άλλα ασύρματα συστήματα:

Τα συστήματα επικοινωνίας οχημάτων λειτουργούν συχνά σε κοινές ζώνες συχνότητας. Το ασύρματο κανάλι θα πρέπει να σχεδιαστεί για να συνυπάρχει με άλλα ασύρματα συστήματα, ελαχιστοποιώντας τις παρεμβολές και εξασφαλίζοντας δίκαιη πρόσβαση στο φάσμα.

Ανθεκτικότητα σε παρεμβολές:

Τα περιβάλλοντα οχημάτων μπορεί να είναι θορυβώδη με διάφορες πηγές παρεμβολών. Το ασύρματο κανάλι θα πρέπει να είναι ανθεκτικό στις παρεμβολές

και μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές όπως η μεταπήδηση συχνότητας ή αλγόριθμοι μετριάσμου των παρεμβολών.

(4.2) Προσομοίωση 5G NR για οχηματικές επικοινωνίες στο MATLAB

Το πρότυπο 3GPP 5G NR ορίζει σύνολα διαμορφώσεων συνδέσεων και κυματομορφών για τους σκοπούς των δοκιμών συμμόρφωσης. Δύο συγκεκριμένοι τύποι κυματομορφών συμμόρφωσης downlink είναι τα μοντέλα δοκιμής NR (NR-TM), για τους σκοπούς της δοκιμής RF του σταθμού βάσης (BS), και τα σταθερά κανάλια αναφοράς downlink (FRC), για τη δοκιμή εισόδου του εξοπλισμού χρήστη (UE).

Τα NR-TMs για το FR1 ορίζονται στο TS 38.141-1 τμήμα 4.9.2, και τα NR-TMs για το FR2 ορίζονται στο TS 38.141-2 τμήμα 4.9.2.

Χρησιμοποιούνται σε μια σειρά δοκιμών RF, συμπεριλαμβανομένων των εξής:

- Ισχύς Εξόδου Bs
- Σφάλμα Ευθυγράμμισης Χρονισμού (Tae)
- Εκπομπές Κατειλημμένου Εύρους Ζώνης
- Αναλογία Διαρροής Γειτονικού Καναλιού (Aclr)
- Ανεπιθύμητες Εκπομπές Ζώνης Λειτουργίας
- Ψευδοεκπομπές Πομπού
- Διαμόρφωση Πομπού

Τα συγκεκριμένα μοντέλα δοκιμών στοχεύουν σε συγκεκριμένα σύνολα μετρήσεων.

Το FRC του κοινού καναλιού φυσικής καθοδικής ζεύξης (PDSCH) για το FR1 ορίζεται στο TS 38.101-1 Παράρτημα A.3, και για το FR2 ορίζεται στο TS 38.101-2 Παράρτημα A.3.

Χρησιμοποιούνται σε διάφορες δοκιμές UE, συμπεριλαμβανομένων των εξής:

- Απαιτήσεις δέκτη UE
- Δοκιμές μέγιστης στάθμης εισόδου UE

Το FRC για το FR1 και το FR2 ορίζεται στο TS 38.104 Annex A.

Χρησιμοποιούνται σε διάφορες δοκιμές λήψης σταθμού βάσης, συμπεριλαμβανομένων των εξής:

- Ευαισθησία αναφοράς
- Επιλεκτικότητα γειτονικού καναλιού (ACS)
- Φραγή εντός και εκτός ζώνης
- Διαμόρφωση δέκτη
- Επιλεκτικότητα εντός του καναλιού
- Δυναμικό εύρος
- Απαιτήσεις επιδόσεων

Οι NR-TMs και FRCs ορίζονται σε ένα τυποποιημένο σύνολο διαμορφώσεων εύρους ζώνης μετάδοσης για ένα έγκυρο εύρος συνδυασμών εύρους ζώνης καναλιού και διαστήματος υποφερόντων.

Αυτό το παράδειγμα εφαρμογής αναφοράς χρησιμοποιεί την κλάση `hNRReferenceWaveformGenerator` του MATLAB. Αυτή η κλάση παρέχει πρόσβαση στους πίνακες διαμόρφωσης εύρους ζώνης, στους καταλόγους μοντέλων δοκιμής και FRC των εκδόσεων 15, 16 και 17 και παρέχει παραγωγή κυματομορφής βασικής ζώνης και απεικόνιση πλέγματος πόρων.

Ξεκινάμε την προσομοίωσή μας σε περιβάλλον Simulink (MATLAB), μέσω του οποίου υλοποιούμε την ελάχιστη δυνατή διαμόρφωση για τις οχηματικές επικοινωνίες, και πιο συγκεκριμένα την QPSK. Η QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) είναι ένα ψηφιακό πρότυπο διαμόρφωσης που αναπαριστά τα ψηφιακά δεδομένα ως μεταβολές της φάσης ενός φέροντος σήματος. Στο QPSK, κάθε σύμβολο αντιπροσωπεύει δύο bits πληροφορίας και υπάρχουν τέσσερις πιθανές καταστάσεις φάσης, καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί σε ένα μοναδικό συνδυασμό δύο bits. Η QPSK είναι μια μορφή της κλειδοποίησης μετατόπισης φάσης (PSK) και χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορα συστήματα επικοινωνίας, όπως η δορυφορική επικοινωνία, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα και η ψηφιακή τηλεόραση.

Ακολουθούν τα βασικά χαρακτηριστικά και οι έννοιες που σχετίζονται με τη διαμόρφωση QPSK:

Αναπαράσταση συμβόλων:

Η QPSK χρησιμοποιεί τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις φάσης για την αναπαράσταση κάθε συμβόλου. Οι καταστάσεις αυτές είναι συνήθως στις 0, 90, 180 και 270 μοίρες. Κάθε κατάσταση φάσης αντιστοιχεί σε έναν μοναδικό συνδυασμό δύο bit.

Διαδικασία διαμόρφωσης:

Κάθε σύμβολο στην QPSK αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη κατάσταση φάσης. Ο διαμορφωτής μετατοπίζει τη φάση του φέροντος σήματος για να αναπαραστήσει την πληροφορία. Το φέρον σήμα είναι συνήθως μια ημιτονοειδής κυματομορφή.

Αντιστοίχιση bit-σε-σύμβολο:

Η QPSK αντιστοιχίζει κάθε ζεύγος bits σε μία από τις τέσσερις πιθανές καταστάσεις φάσης. Η αντιστοίχιση γίνεται συνήθως με τη χρήση κώδικα Gray για να διασφαλιστεί ότι τα γειτονικά σύμβολα διαφέρουν μόνο κατά ένα bit, μειώνοντας την πιθανότητα σφαλμάτων κατά την αποδιαμόρφωση.

Διάγραμμα αστερισμού:

Το διάγραμμα αστερισμού είναι μια γραφική αναπαράσταση του μιγαδικού επιπέδου, όπου κάθε σημείο αντιστοιχεί σε ένα μοναδικό σύμβολο. Στην περίπτωση του QPSK, το διάγραμμα αστερισμού αποτελείται από τέσσερα σημεία, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει μία από τις τέσσερις πιθανές καταστάσεις φάσης.

Ρυθμός bit και ρυθμός συμβόλων:

Ο ρυθμός bit στην QPSK είναι διπλάσιος του ρυθμού συμβόλων, δεδομένου ότι κάθε σύμβολο αντιπροσωπεύει δύο bits.

Ορθογωνιότητα:

Η QPSK αξιοποιεί την ορθογωνιότητα μεταξύ των διαφορετικών καταστάσεων φάσης. Οι καταστάσεις φάσης επιλέγονται προσεκτικά ώστε να είναι ορθογώνιες, γεγονός που απλοποιεί τη διαδικασία αποδιαμόρφωσης και μειώνει την πιθανότητα σφαλμάτων.

Ευαισθησία του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR):

Το QPSK είναι ευαίσθητο στο θόρυβο και στις αλλαγές στις συνθήκες του καναλιού. Η απόδοση του QPSK όσον αφορά τον ρυθμό σφάλματος bit (BER) επηρεάζεται από τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) του καναλιού επικοινωνίας.

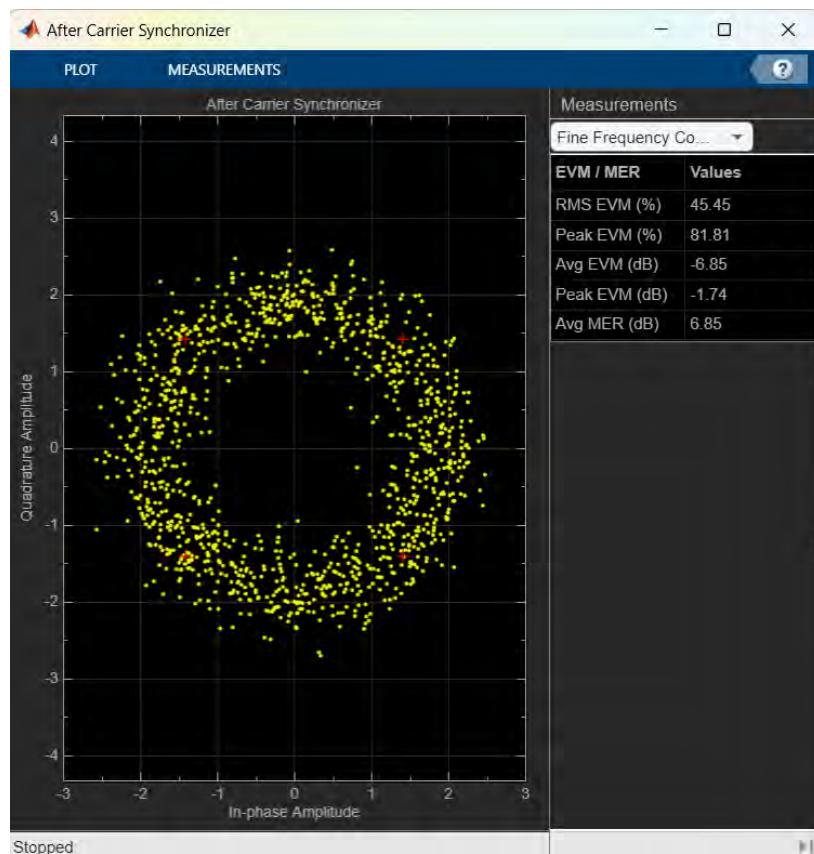
Φασματική Απόδοση:

Εφαρμογές:

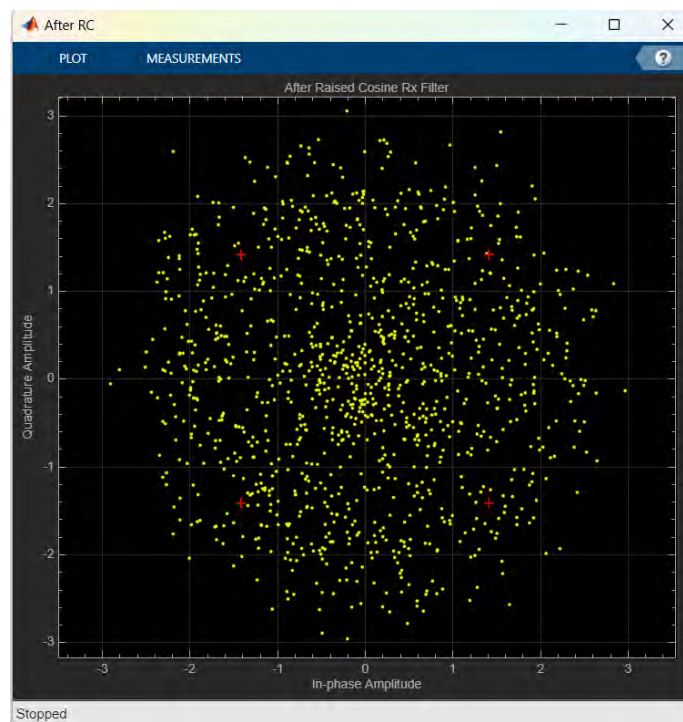
Η QPSK χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές όπου η φασματική αποδοτικότητα είναι σημαντική και η μέτρια πολυπλοκότητα στο δέκτη είναι αποδεκτή. Χρησιμοποιείται ευρέως σε ψηφιακά συστήματα επικοινωνίας, δορυφορικές επικοινωνίες και πρότυπα ασύρματης επικοινωνίας.

Στην Εικόνα 23 παραθέτουμε το block diagram της υλοποίησης της διαμόρφωσης QPSK στο Simulink (εργαλείο του περιβάλλοντος MATLAB). Το «έτοιμο» εργαλείο προσαρμόζεται από εμάς κατάλληλα για να μελετήσουμε την διαμόρφωση σε οριακές συνθήκες με λόγο σήματος-προς-θόρυβο ίσο με 10 dB. Οι απαιτήσεις της διαμόρφωσης QPSK όπως βλέπουμε και στον Πίνακα 7, αφορούν στην ενεργειακή στάθμη οικοδόμησης bit ανά ενέργεια baseband θορύβου, ήτοι ο συντελεστής E_b/N_0 . Ο λόγος SNR αφορά στην ζωνοδιαβατή μετάδοση στο κανάλι (ασύρματος διαυλος). Παρατηρούμε πως για συνθήκες «σωστής απόδοσης», η διαμόρφωση QPSK απαιτεί τουλάχιστον 13.6 dB SNR έτσι ώστε να υπάρχει μία διαφορά 3 dB ανάμεσα στους δύο λόγους. Για εύρος ζώνης 20 MHz που θα χρησιμοποιηθεί στις παρακάτω προσομοιώσεις, η QPSK στην ελάχιστη στάθμη «σωστής απόδοσης» δίνει ρυθμό μετάδοσης 40 Mbps.

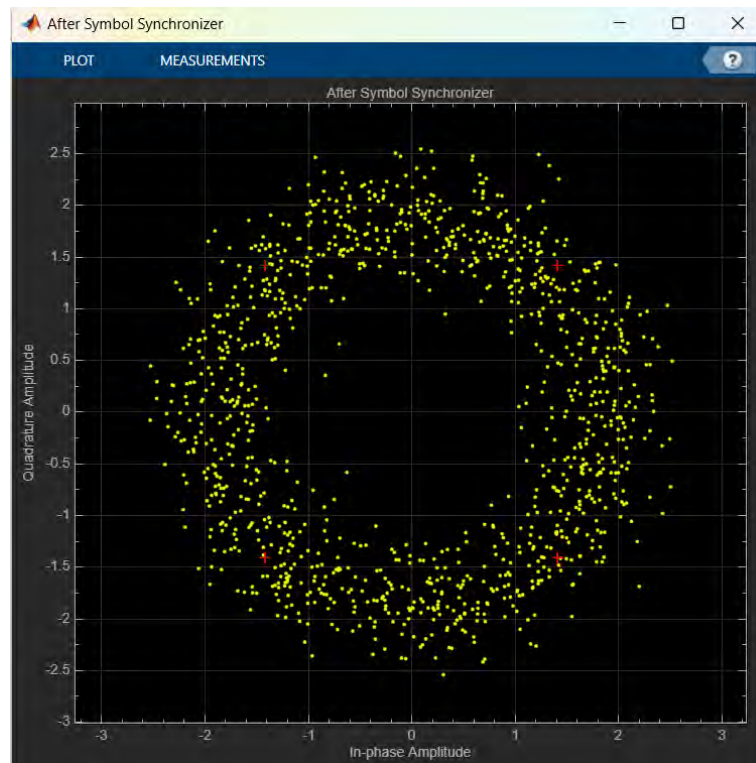




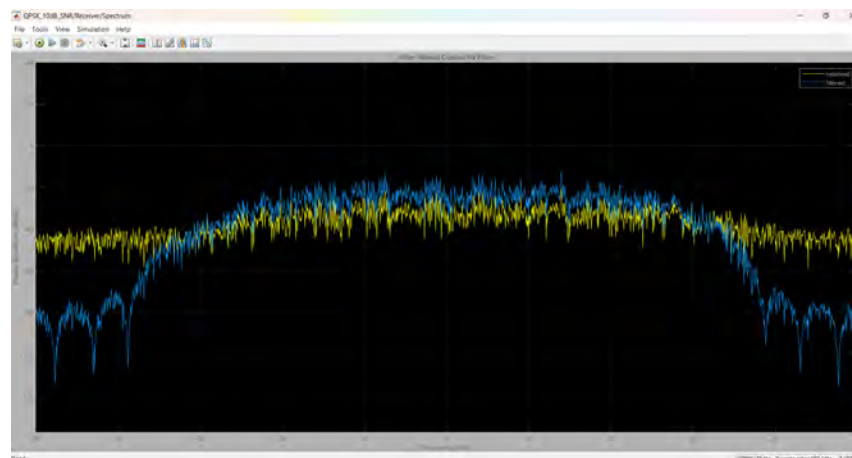
Εικόνα 24 Λαμβανόμενο σήμα (αστερισμός) στην βαθμίδα συγχρονισμού φορέα στον δέκτη



Εικόνα 25 Λαμβανόμενο σήμα (αστερισμός) στην βαθμίδα φίλτρου ανυψωμένου συνημιτόνου στον δέκτη



Εικόνα 26 Λαμβανόμενο σήμα (αστερισμός) στην βαθμίδα συγχρονισμού συμβόλων στον δέκτη



Εικόνα 27 FCC Φασματική ανάλυση λαμβανόμενου σήματος ως προς τον θόρυβο

Στις Εικόνες 24 έως 27 παρατηρούμε σε διαδοχικές βαθμίδες του δέκτη, την απόδοση της λειτουργίας της διαμόρφωσης QPSK για οριακές συνθήκες SNR=10 dB. Αρχικά έχουμε την βαθμίδα συγχρονισμού του φορέα για τον δέκτη, σε σχέση με τον πομπό, για να γίνει η σωστή ανίχνευση φάσης (Phase-shift keying) (Εικόνα 24).

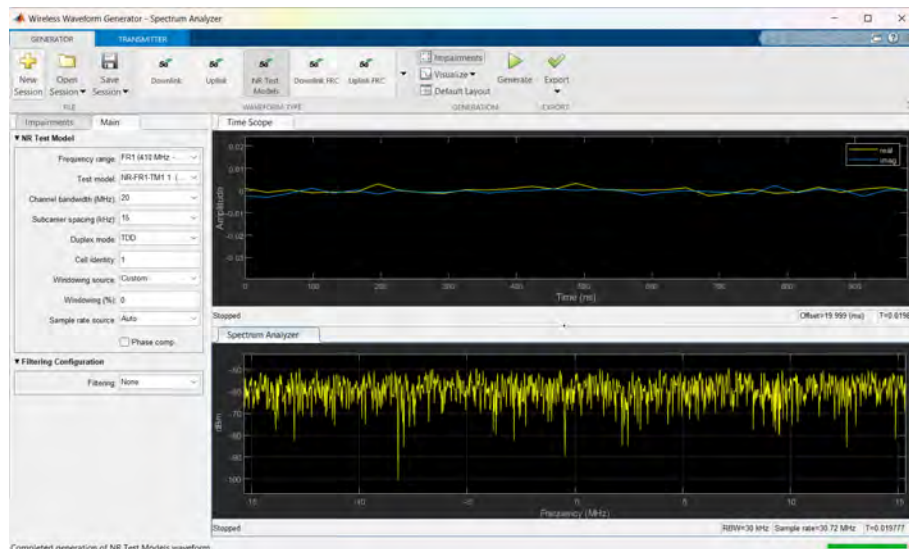
Στην συνέχεια (Εικόνα 25) έχουμε την βαθμίδα φίλτρου ανυψωμένου συνημίτονου όπου λαμβάνουμε το σήμα θεμελιακής ζώνης (baseband) σε σχέση με το αρχικά λαμβανόμενο ζωνοδιαβατό σήμα που έχουμε στην είσοδο του δέκτη. Παρατηρούμε την μέτρια απόδοση της διαμόρφωσης QPSK (marginal condition) για τις συνθήκες καναλιού που έχουμε θεωρήσει. Στην Εικόνα 26 έχουμε τον αστερισμό του λαμβανόμενου σήματος στην βαθμίδα συγχρονισμού συμβόλων. Τέλος στην Εικόνα 27 έχουμε την φασματική ανάλυση της στάθμης του λαμβανόμενου σήματος για εύρος 20 MHz ως προς την στάθμη φασματικής πυκνότητας ισχύος του θορύβου.

Αυτές οι οριακές συνθήκες χρησιμοποιούνται ως αρχικό trial test στο εργαλείο 5G New Radio (NR) όπου το μοντέλο καναλιού NR FR1 TM1.1 θέτει ως ελάχιστη ρήτρα διαμόρφωσης (Uniform, QPSK) με SNR=10 dB, όπως βλέπουμε στην Εικόνα 28. Παρατηρούμε πολύ έντονα φαινόμενα τόσο στις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (άνοιγμα της μέσης λαμβανόμενης ισχύος ανά μονάδα φάσματος) όσο και στις διαλείψεις μικρής κλίμακας (ριπές πτώσης της λαμβανόμενης ισχύος ανά πυκνό υπο-διάστημα φάσματος).



Εικόνα 28 5G New Radio (NR) με μοντέλο καναλιού NR FR1 TM1.1 (Uniform, QPSK) με SNR=10 dB

Στην Εικόνα 29 παρατηρούμε την απόδοση του μοντέλου NR FR1 TM1.1 (Uniform, QPSK) για SNR=20 dB. Η συμπεριφορά των φαινομένων διαλείψεων μεγάλης και μικρής κλίμακας είναι εμφανώς βελτιωμένη.



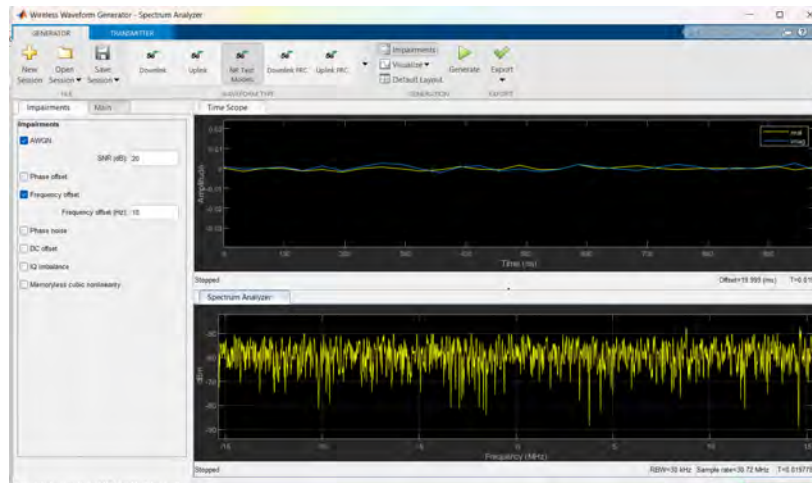
Εικόνα 29 5G New Radio (NR) με μοντέλο καναλιού NR FR1 TM1.1 (Uniform, QPSK) με SNR=20 dB

Στην συνέχεια, ως επόμενο trial test στο εργαλείο 5G New Radio (NR) έχουμε το μοντέλο καναλιού NR FR1 TM3.1 που θέτει ως ελάχιστη ρήτρα διαμόρφωσης (Uniform, 64-QAM) με SNR=10 dB, όπως βλέπουμε στην Εικόνα 30. Παρατηρούμε πολύ έντονα φαινόμενα τόσο στις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (άνοιγμα της μέσης λαμβανόμενης ισχύος ανά μονάδα φάσματος) όσο και στις διαλείψεις μικρής κλίμακας (ριπές πτώσης της λαμβανόμενης ισχύος ανά πυκνό υπο-διάστημα φάσματος).



Εικόνα 30 5G New Radio (NR) με μοντέλο καναλιού NR FR1 TM3.1 (Uniform, 64-QAM) με SNR=10 dB

Αξιζει να σημειωθεί από τον Πίνακα 7 πως η συγκεκριμένη διαμόρφωση έχει πολύ υψηλότερες απαιτήσεις τόσο για την παράμετρο E_b/N_0 όσο και για την παράμετρο SNR. Από την μαθηματική σχέση (4.1) υπολογίζονται οι ρυθμοί μετάδοσης τόσο για την διαμόρφωση QPSK όσο και για την 64-QAM. Στην Εικόνα 31 παρατηρούμε την απόδοση του μοντέλου NR FR1 TM3.1 (Uniform, 64-QAM) για SNR=20 dB. Η γενική παρατήρηση είναι πως πρόκειται για μία εμφανώς βελτιωμένη συμπεριφορά.



Εικόνα 31 5G New Radio (NR) με μοντέλο καναλιού NR FR1 TM3.1 (Uniform, 64-QAM) με SNR=20 dB

Στην πραγματικότητα όμως, το μοντέλο αποδίδει «σωστά» όταν καλυφθεί η ρήτρα SNR του Πίνακα 7 και αυτό συμβαίνει στο τελευταίο test trial που εξετάζουμε για το μοντέλο NR FR1 TM3.1 (Uniform, 64-QAM), όπου SNR=30 dB. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στην Εικόνα 32.



Εικόνα 32 5G New Radio (NR) με μοντέλο καναλιού NR FR1 TM3.1 (Uniform, 64-QAM) με SNR=30 dB

Από τα παραπάνω προκύπτει πως η τεχνολογία 5G New Radio (NR) αποδίδει τα βέλτιστα με πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης που για την τελευταία δοκιμή στο test trial των 30 dB μπορούν να φτάσουν, με βάση την Εξ (4.1) μέχρι και τα 150-180 Mbps. Αυτό όμως προϋποθέτει πολύ καλές συνθήκες ασύρματης μετάδοσης (SNR $\rightarrow$ 30 dB) και ασφαλώς το αντίστοιχο κόστος για τον εξοπλισμό 5G. Αυτό το κόστος μπορεί να αντισταθμιστεί με χρήση network slicing από έτοιμη υποδομή παρόχου κινητής τηλεφωνίας 5G. Με βάση την παράθεση των δυνατοτήτων της τεχνολογίας DSRC που παραθέσαμε στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας, προβαίνουμε σε μία συγκριτική αντιπαραβολή 5G και DSRC προτού δώσουμε αντίστοιχα αποτελέσματα προσομοίωσης για το DSRC σε ρεαλιστικό περιβάλλον διάδοσης οχηματικών επικοινωνιών:

1. Ζώνες συχνοτήτων:

5G: Λειτουργεί σε ένα ευρύ φάσμα ζωνών συχνοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των ζωνών κάτω των 6 GHz και των mmWave. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει στο 5G να εξυπηρετεί ποικίλες ανάγκες επικοινωνίας, αλλά οι υψηλότερες συχνότητες ενδέχεται να έχουν μικρότερα χαρακτηριστικά εμβέλειας και διείσδυσης.

DSRC: Λειτουργεί στη ζώνη των 5,9 GHz που διατίθεται ειδικά για ευφυή συστήματα μεταφορών. Η χρήση αποκλειστικής ζώνης DSRC μειώνει τον κίνδυνο παρεμβολών από άλλες ασύρματες συσκευές.

2. Εμβέλεια και κάλυψη:

5G: Προσφέρει μεταβλητή εμβέλεια ανάλογα με τη ζώνη συχνοτήτων. Οι υψηλότερες συχνότητες (mmWave) παρέχουν υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, αλλά έχουν μικρότερη εμβέλεια και ενδέχεται να επηρεάζονται από εμπόδια.

DSRC: Συνήθως έχει σχεδιαστεί για επικοινωνία μικρής έως μεσαίας εμβέλειας, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές όπως η επικοινωνία οχήματος με όχημα (V2V) και οχήματος με υποδομή (V2I) εντός συγκεκριμένης εγγύτητας.

3. Ρυθμοί δεδομένων:

5G: Υποστηρίζει σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων σε σύγκριση με το DSRC. Αυτό επιτρέπει τη μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων, υποστηρίζοντας εφαρμογές όπως η ροή βίντεο, οι χάρτες υψηλής ευκρίνειας και η επαυξημένη πραγματικότητα.

DSRC: Παρέχει χαμηλότερους ρυθμούς δεδομένων σε σύγκριση με το 5G, αλλά είναι γενικά επαρκής για κρίσιμες για την ασφάλεια εφαρμογές όπως η αποφυγή σύγκρουσης και ο συνεργατικός προσαρμοστικός έλεγχος ταχύτητας.

4. Καθυστέρηση:

5G: Προσφέρει χαμηλότερη καθυστέρηση, η οποία είναι κρίσιμη για εφαρμογές που απαιτούν απόκριση σε πραγματικό χρόνο, όπως η αυτόνομη οδήγηση και η πέδηση έκτακτης ανάγκης.

DSRC: Παρέχει σχετικά χαμηλή καθυστέρηση κατάλληλη για εφαρμογές ασφαλείας, αλλά το 5G μπορεί να προσφέρει βελτιώσεις στην εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης (URLLC) για πιο απαιτητικές περιπτώσεις χρήσης.

5. Τυποποίηση:

5G: Μια παγκοσμίως τυποποιημένη κυψελοειδής τεχνολογία με συνεχείς εξελίξεις και βελτιώσεις. Αποτελεί μέρος των ευρύτερων προτύπων του έργου σύμπραξης 3ης γενιάς (3GPP).

DSRC: Ένα ειδικό πρότυπο επικοινωνίας μικρής εμβέλειας που καθορίζεται στο IEEE 802.11p, με έμφαση στα ευφυή συστήματα μεταφορών.

6. Κατανομή φάσματος:

5G: Χρησιμοποιεί αδειοδοτημένο και μη αδειοδοτημένο φάσμα, επιτρέποντας ευελιξία και επεκτασιμότητα. Διαφορετικοί φορείς εκμετάλλευσης μπορούν να αναπτύξουν το 5G σε διάφορες ζώνες συχνοτήτων.

DSRC: Διαθέτει αποκλειστική ζώνη συχνοτήτων (5,9 GHz) που διατίθεται ειδικά για την επικοινωνία οχημάτων. Αυτό το αποκλειστικό φάσμα παρέχει προστασία από παρεμβολές, αλλά μπορεί να αντιμετωπίσει προκλήσεις όσον αφορά τη διαθεσιμότητα του φάσματος.

7. Εστίαση στην εφαρμογή:

5G: Σχεδιάστηκε για να υποστηρίξει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων της ενισχυμένης κινητής ευρυζωνικότητας (eMBB), της μαζικής επικοινωνίας τύπου μηχανής (mMTC) και του URLLC, καθιστώντας το κατάλληλο για διάφορες περιπτώσεις χρήσης πέραν των επικοινωνιών οχημάτων.

DSRC: Επικεντρώνεται κυρίως σε εφαρμογές ασφαλείας σε περιβάλλοντα οχημάτων, όπως η αποφυγή συγκρούσεων και η διαχείριση της κυκλοφορίας.

8. Οικοσύστημα και ανάπτυξη:

5G: Μέρος ενός ευρύτερου κυψελοειδούς οικοσυστήματος με εκτεταμένη ανάπτυξη υποδομών από φορείς εκμετάλλευσης τηλεπικοινωνιών. Τα δίκτυα 5G αναπτύσσονται σε παγκόσμιο επίπεδο.

DSRC: Η ανάπτυξη είναι πιο περιορισμένη και η τεχνολογία έχει δει διαφορετικά επίπεδα υιοθέτησης σε διάφορες περιοχές. Το οικοσύστημά της αφορά ειδικά τα ευφυή συστήματα μεταφορών.

9. Συνύπαρξη με το Wi-Fi:

5G: Λειτουργεί ανεξάρτητα από το Wi-Fi, αλλά ορισμένες ζώνες φάσματος ενδέχεται να επικαλύπτονται. Εξετάζονται μηχανισμοί συνύπαρξης για την αποφυγή παρεμβολών.

DSRC: Χρησιμοποιεί την ίδια ζώνη συχνοτήτων με το Wi-Fi (802.11a), γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε πιθανές προκλήσεις παρεμβολών σε περιοχές με υψηλή χρήση Wi-Fi.

10. Ασφάλεια:

5G: Ενσωματώνει προηγμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας, συμπεριλαμβανομένων των μηχανισμών κρυπτογράφησης και ελέγχου ταυτότητας, για την προστασία των καναλιών επικοινωνίας.

DSRC: Έχει εφαρμόσει μέτρα ασφαλείας, αλλά έχουν εκφραστεί ανησυχίες για πιθανά τρωτά σημεία.

11. Παγκόσμια τυποποίηση:

5G: Ένα παγκόσμιο πρότυπο που αναπτύχθηκε από το 3GPP, διασφαλίζοντας τη συνοχή και τη διαλειτουργικότητα σε διάφορες περιοχές.

DSRC: Τηρεί τα πρότυπα IEEE, αλλά μπορεί να διαφέρει στην εφαρμογή και την ανάπτυξη από περιοχή σε περιοχή.

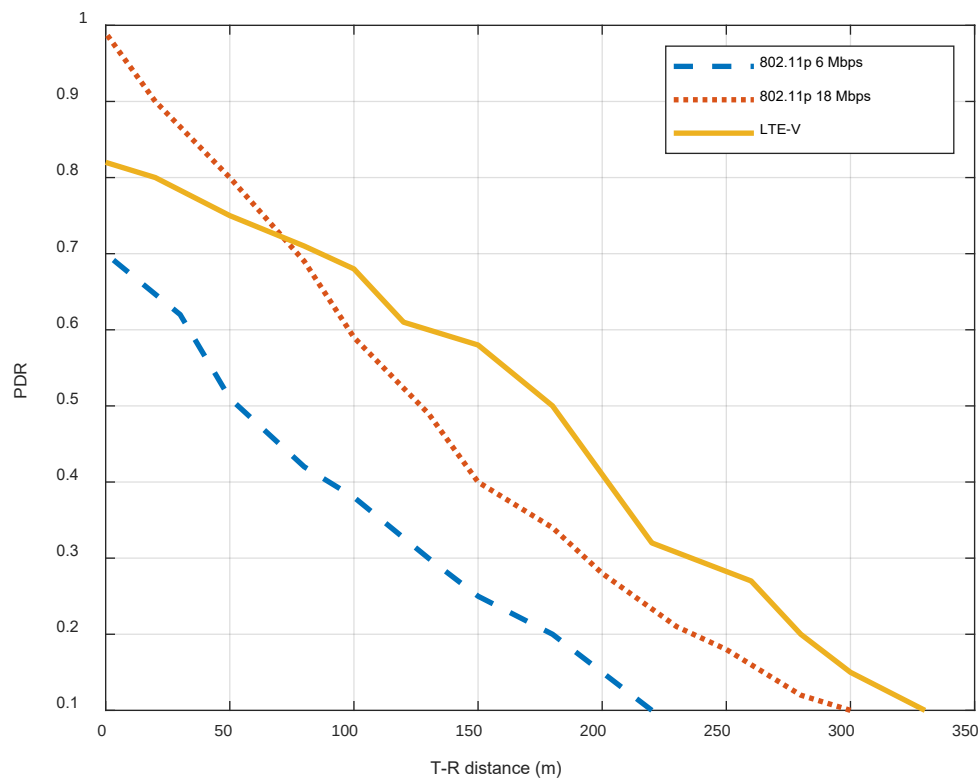
Συνοπτικά, ενώ τόσο το 5G όσο και το DSRC έχουν σχεδιαστεί για επικοινωνίες οχημάτων, έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, τομείς εστίασης και σενάρια ανάπτυξης. Η επιλογή μεταξύ των δύο εξαρτάται από τις ειδικές απαιτήσεις των εφαρμογών και το ρυθμιστικό και βιομηχανικό τοπίο σε μια δεδομένη περιοχή. Η υλοποίηση και η ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών συνεχίζουν να εξελίσσονται, με συνεχή έρευνα και πρόοδο τόσο στο 5G όσο και στο DSRC.

Πίνακας 7 Τεχνικές διαμόρφωσης και απαιτήσεις Eb/No και SNR

Modulation Technique	SNR (dB)	Eb/No (dB)
BPSK	10.6	10.6
QPSK	13.6	10.6
4-QAM	13.6	10.6
8-QAM	17.6	10.6
8-PSK	18.5	14
16-PSK	24.3	18.3
16-QAM	20.5	14.5
32-QAM	24.4	17.4
64-QAM	26.6	18.8

Σημειώνουμε ότι ο ρυθμός μετάδοσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$R_s = \left(\frac{S/N}{E_b/N_o} \right) \times B \quad (4.1)$$



Εικόνα 33 FCC Απόδοση πρωτοκόλλων LTE (4G) και 802.11p (DSRC) για μεταβολή εμβέλειας και ρυθμού μετάδοσης

Στην Εικόνα 33 παρατηρούμε την απόδοση των πρωτοκόλλων DSRC και LTE (4G) αναφορικά με αντίστοιχα σενάρια προσομοίωσης για οχηματικές επικοινωνίες. Επικεντρώνουμε την ανάλυσή μας στο πρωτόκολλο DSRC, για τον σκοπό της συγκριτικής αντιπαράθεσης με το 5G. Οι προσομοιώσεις της αρχικής μοντελοποίησης DSRC προκύπτουν από προγενέστερη έρευνα [56]. Στην δική μας εργασία, έχουμε πραγματοποιήσει νέο υπολογισμό της απόδοσης Επιτυχούς Παράδοσης Πακέτων (Packet Delivery Rate, PDR, σε ποσοστό %) ως προς την εμβέλεια της ασύρματης επικοινωνίας σε περιβάλλον V2X.

Παρατηρούμε πως η εμβέλεια μπορεί να αυξηθεί με αντιστάθμισμα την μείωση της απόδοσης. Αντίστροφα, η απόδοση μπορεί να αυξηθεί με συγκράτηση της εμβέλειας, αυξάνοντας τον ρυθμό μετάδοσης, ή ουσιαστικότερα, επιτυγχάνοντας υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης για τις ίδιες συνθήκες ασύρματου διαύλου.

Η τεχνολογία 5G για το χειρότερο σενάριο της QPSK διαμόρφωσης προσφέρει, στο πλαίσιο της New Radio υλοποίησης, ρυθμό μετάδοσης τουλάχιστον 40 Mbps. Συνεπώς οι προδιαγραφές του 5G New Radio υπερσκελίζουν την συμβατική απόδοση του DSRC. Όμως το πρωτόκολλο DSRC προσφέρει υπηρεσίες εντός των ζητούμενων προδιαγραφών με πολύ χαμηλότερο κόστος κεφαλαιακής επένδυσης, λειτουργικών εξόδων και συντήρησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Συμπεράσματα

(5.1) Συμπεράσματα

Στη μοντελοποίηση καναλιών 5G, η μετατόπιση συχνότητας αναφέρεται στη διαφορά μεταξύ της φέρουσας συχνότητας του μεταδιδόμενου σήματος και της φέρουσας συχνότητας στο δέκτη. Αυτή η μετατόπιση μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των ανακρίβειών του ταλαντωτή, των μετατοπίσεων Doppler λόγω της σχετικής κίνησης μεταξύ πομπού και δέκτη και άλλων επιδράσεων.

Ακολουθούν ορισμένες βασικές εκτιμήσεις σχετικά με την αντιστάθμιση συχνότητας στις επικοινωνίες οχημάτων:

Doppler Shift:

Ένας από τους κύριους παράγοντες που συμβάλλουν στη μετατόπιση συχνότητας στις επικοινωνίες οχημάτων είναι το φαινόμενο Doppler. Καθώς τα οχήματα κινούνται, υπάρχει μια σχετική κίνηση μεταξύ του πομπού (π.χ. ένα όχημα ή μια μονάδα στην άκρη του δρόμου) και του δέκτη (π.χ. ένα άλλο όχημα ή ένας σταθμός βάσης). Αυτή η σχετική κίνηση προκαλεί μια μετατόπιση Doppler, που οδηγεί σε μετατόπιση συχνότητας.

Ανακρίβειες ταλαντωτή:

Οι τοπικοί ταλαντωτές στους πομπούς και τους δέκτες μπορεί να έχουν ανακρίβειες, συμβάλλοντας σε αποκλίσεις συχνότητας. Στις επικοινωνίες οχημάτων, όπου η κινητικότητα αποτελεί βασικό παράγοντα, η διατήρηση ακριβούς συγχρονισμού συχνότητας καθίσταται πρόκληση.

Επιπτώσεις στην ποιότητα της επικοινωνίας:

Η μετατόπιση συχνότητας μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα των συνδέσεων επικοινωνίας στα δίκτυα οχημάτων. Ο ανακριβής συγχρονισμός μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση του σήματος, επηρεάζοντας την αξιοπιστία της μετάδοσης και λήψης μηνυμάτων.

Τεχνικές αντιστάθμισης:

Για τον μετριασμό των επιπτώσεων της μετατόπισης συχνότητας, τα συστήματα επικοινωνίας οχημάτων χρησιμοποιούν τεχνικές αντιστάθμισης. Αυτές μπορεί να

περιλαμβάνουν αλγόριθμους προσαρμοστικού συγχρονισμού συχνότητας που προσαρμόζουν συνεχώς τη συχνότητα του δέκτη ώστε να ευθυγραμμίζεται με τη συχνότητα του πομπού.

Δίκτυα Ad Hoc οχημάτων (VANET):

Σε σενάρια όπου τα οχήματα σχηματίζουν δίκτυα ad hoc (VANETs) για συνεργατική επικοινωνία, ο ακριβής συγχρονισμός συχνότητας είναι ζωτικής σημασίας. Τα VANET μπορούν να χρησιμοποιούν ειδικά πρωτόκολλα και αλγόριθμους επικοινωνίας για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που θέτουν η κινητικότητα και οι δυναμικές μετατοπίσεις συχνότητας.

Πρότυπα επικοινωνίας:

Τα πρότυπα επικοινωνίας για δίκτυα οχημάτων, όπως τα Dedicated Short-Range Communications (DSRC) ή Cellular-V2X (C-V2X), περιλαμβάνουν διατάξεις για το χειρισμό της μετατόπισης συχνότητας. Τα πρότυπα αυτά καθορίζουν μηχανισμούς και διαδικασίες συγχρονισμού για την εξασφάλιση αξιόπιστης επικοινωνίας μεταξύ οχημάτων και υποδομής.

Μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες:

Τα συστήματα επικοινωνίας οχημάτων λειτουργούν σε ποικίλα και δυναμικά περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων των αστικών περιοχών με κτίρια και φυλλώματα, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά διάδοσης των ραδιοσημάτων. Αυτές οι μεταβολές μπορεί να συμβάλουν στη μετατόπιση συχνότητας και το σύστημα επικοινωνίας πρέπει να είναι αρκετά ισχυρό ώστε να μπορεί να αντιμετωπίσει τέτοιες συνθήκες.

Επίδραση στις υπηρεσίες που βασίζονται στην τοποθεσία:

Η μετατόπιση συχνότητας μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των υπηρεσιών που βασίζονται στην τοποθεσία (LBS) στην επικοινωνία οχημάτων. Ο ακριβής συγχρονισμός χρόνου και συχνότητας είναι απαραίτητος για τον ακριβή εντοπισμό θέσης και τον συντονισμό των οχημάτων.

Η ακριβής μοντελοποίηση και η αντιστάθμιση της μετατόπισης συχνότητας αποτελούν κρίσιμες πτυχές του σχεδιασμού αξιόπιστων και αποδοτικών συστημάτων επικοινωνίας οχημάτων, ιδίως στο πλαίσιο των ευφυών συστημάτων μεταφορών, όπου η έγκαιρη και ακριβής επικοινωνία είναι ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα.

Στα πλαίσια του σεναρίου εργασίας έχουμε θεωρήσει συμβατική τιμή Doppler shift 10 Hz. Σκοπός της προσομοίωσης είναι να κλιμακώσει την βελτίωση (ή αντίστροφα την επιδείνωση) των συνθήκων ασύρματης μετάδοσης στο κανάλι οχηματικών επικοινωνιών. Η αυστηρότερο προδιαγραφή του 5G NR, εφόσον τηρηθεί, οδηγεί σε καλύτερο τελικό αποτέλεσμα τόσο ως προς τον ρυθμό μετάδοσης όσο και ως προς την συσχέτιση PDR- εμβέλειας που εξετάζει η Εικόνα 33 για τα DSRC και LTE (4G). Αυτό όμως που αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα για το 5G NR είναι το κόστος. Η αντιστάθμιση κόστους με την επιλογή της στρατηγικής σχεδίασης network slicing (που αιτιολογεί την επιλογή εύρους ζώνης στα 20 MHz για τις προσομοιώσεις μας), δεν αναιρεί την οικονομική επιβάρυνση του 5G NR σε σχέση με το DSRC.

Συνεπώς, το τελικό κριτήριο επιλογής σχετίζεται με ευρύτερες τεχνο-οικονομικές συγκρίσεις και θεωρήσεις, οι προεκτάσεις των οποίων σε κάθε περίπτωση υπερβαίνουν τους σκοπούς της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας.

(5.2) Σημερινή κατάσταση

Η τεχνολογία Vehicle-to-everything (V2X) θεωρείται ευρέως από τους ειδικούς του κλάδου ως μια πολλά υποσχόμενη λύση για τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας και μακροπρόθεσμα την επίτευξη της πλήρως αυτόνομης οδήγησης. Ωστόσο, για να δημιουργηθεί ένα λειτουργικό και διαλειτουργικό οικοσύστημα V2X, θα πρέπει όλοι οι ενδιαφερόμενοι να συμφωνήσουν σε κρίσιμα και θεμελιώδη ανοιχτά θέματα σχετικά με την υλοποίηση της V2X τεχνολογίας.

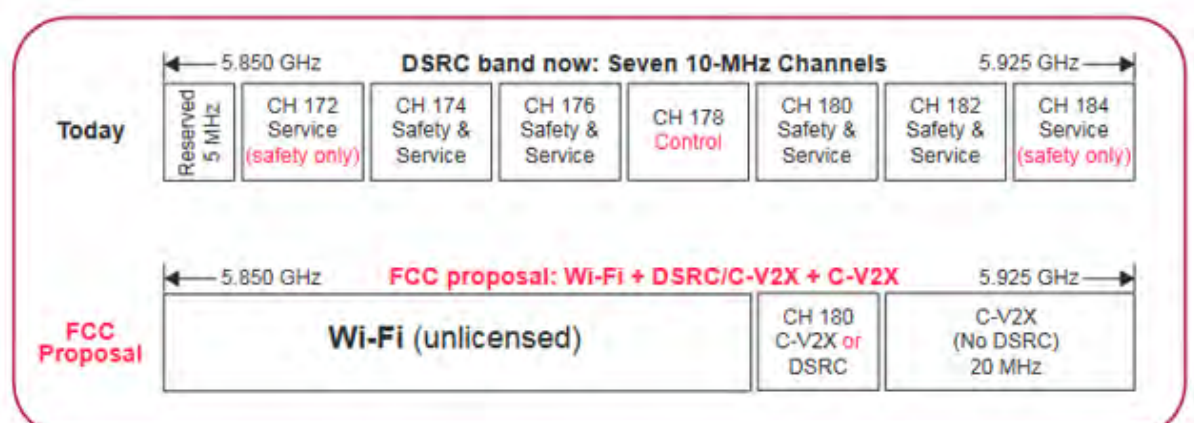
Αρκετές χώρες έχουν υιοθετήσει την στρατηγική Vision Zero, η οποία ξεκίνησε το 1990 στη Σουηδία και είναι πλέον πρωταρχικός στόχος στην Ευρώπη, κερδίζοντας τελευταία έδαφος και στην Αμερική. Η στρατηγική αυτή στοχεύει στην εξάλειψη των θανάσιμων ατυχημάτων και των ατυχημάτων που οδηγούν σε πολύ σοβαρούς τραυματισμούς, αυξάνοντας την ασφάλεια, την υγεία και παρέχοντας δίκαιη κινητικότητα σε όλους.

Το V2X βρίσκεται στην ατζέντα της Ευρώπης από τις αρχές της δεκαετίας του 2010 και οι μελέτες συνεχίζουν για τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου και διαλειτουργικού δικτύου C-ITS που εκτείνεται πέρα από τα ευρωπαϊκά σύνορα. Στον ιδιωτικό τομέα, πολλοί κατασκευαστές αυτοκινήτων OEMs (Original

Equipment Manufacturers) έχουν ενσωματώσει μονάδες V2X (OBU) στα νέα οχήματά τους, με πρώτη την Volkswagen. Η BMW επίσης, ανακοίνωσε πρόσφατα ότι σχεδιάζει να αναπτύξει V2X στα οχήματά της για αμφίδρομη φόρτιση από όχημα σε δίκτυο. Η Mercedes-Benz έχει επίσης σχέδια να αναπτύξει το V2X, αλλά μέχρι στιγμής προωθεί την υπηρεσία Cloud ως μέσο για την παροχή προειδοποιήσεων από όχημα σε όχημα (V2V) σε πραγματικό χρόνο. Στην Ιαπωνία, η Toyota έχει ήδη πουλήσει οχήματα ενσωματωμένα με τεχνολογία DSRC V2X και οι μετρήσεις σε πραγματικό οδικό δίκτυο έχουν δείξει πως ήδη από τις ειδοποιήσεις για στροφή δεξιά, έχει μειωθεί ο αριθμός των ατυχημάτων κατά 40%.

Η Ευρώπη έχει εισέλθει σε μία αρχική φάση εφαρμογής του V2X αν και χρειάζονται περισσότερες μονάδες OBU και RSU να εγκατασταθούν στα οδικά δίκτυα. Η ανάπτυξη V2X θα πάρει σίγουρα πάνω από δεκαετία μέχρι οι οδηγοί να ανανεώσουν τα οχήματά τους και να προμηθευτούν ένα αυτοκίνητο με ενσωματωμένη V2X τεχνολογία, αλλά παρόλα αυτά φαίνεται πως κι άλλοι παράγοντες καθυστερούν την ολοκληρωτική εφαρμογή V2X. Τροχοπέδη αποτελεί και η κατάσταση στην Αμερική με το φάσμα 5.9GHz και τις τεχνολογίες που θα υποστηρίξει.

Το 2019, ο FCC υιοθέτησε τροπολογία (NPRM – Notice of Proposed Rulemaking), η οποία δεσμεύει τα χαμηλότερα 45 MHz της ζώνης ITS 5.9GHz για λειτουργίες Wi-Fi χωρίς άδεια (Unlicensed services) και 30MHz για υπηρεσίες μετακίνησης, 20MHz για C-V2X και 10MHz DSRC. Αρχικά ο FCC είχε δεσμεύσει όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, 75MHz για την οχηματική επικοινωνία. Όπως ισχυρίστηκε στην τροπολογία αυτή, έχουν περάσει περισσότερα από 20 χρόνια που δεν έχει σημειωθεί η πρόοδος που είχε προβλεφθεί για την



Εικόνα 34 FCC Τροποποίηση ITS band 5.9GHz

υλοποίηση και εφαρμογή V2X στην Αμερική οπότε αποδεσμεύει κομμάτι της μπάντας του ITS (Εικόνα 34, [55]).

Φυσικά, υπήρξαν πολλές ενστάσεις για την τροποποίηση αυτή και κατατέθηκε μήνυση από τους Υπουργείο Μεταφορών της Αμερικής, τον NHTSA, τον ITSA, Toyota, GM κ.α. Οι ενστάσεις εστιάζουν στις επιπτώσεις που έχει η τροπολογία στην ασφάλεια του οδικού δικτύου. Με την τροπολογία αυτή, αυξάνονται οι πιθανότητες να καθυστερήσει η υλοποίηση της V2X τεχνολογίας ακόμη περισσότερο και οι αλλαγές που θα χρειαστούν στα υπάρχοντα συστήματα V2X θα κοστίσουν περισσότερο από 500 εκατομμύρια δολάρια. Επίσης, δίνοντας τα 45MHz για unlicensed services, αυξάνεται η πιθανότητα παρεμβολών στο φάσμα ITS κι επομένως θέτει σε κίνδυνο την αξιοπιστία των οχηματικών επικοινωνιών, όπως επίσης καθιστούν σαφές πως δεν επαρκούν 30MHz (ή ακόμη λιγότερα) για την οχηματική επικοινωνία.

Σημαντικό είναι επίσης, ποια τεχνολογία θα επιλέξει ο FCC για τις εφαρμογές ασφάλειας V2X στην Αμερική. Υπάρχει μεγάλη πίεση και σκληρή πολιτική (politics) από κάποιες εταιρείες τηλεπικοινωνίας, OEMs και κυβερνήσεις να υιοθετηθεί η C-V2X έναντι της DSRC. Οι υποστηρικτές βέβαια της DSRC, επισημαίνουν πως μια cellular τεχνολογία δεν είναι κατάλληλη για τις κρίσιμες εφαρμογές οχηματικής ασφάλειας, λόγω του χρόνου απόκρισης και της μη συμβατότητας νέας γενιάς τεχνολογίας 5G NR με τις προηγούμενες εκδόσεις LTE-V2X.

Με την Ευρώπη να παραμένει διχασμένη ανάμεσα σε DSRC και C-V2X (η Volkswagen χρησιμοποιεί DSRC στα οχήματά της, ενώ η BMW και η Daimler έχουν στραφεί στο C-V2X), με την Αμερική και την Κίνα να συμφωνούν στη χρήση C-V2X καταργώντας τη τεχνολογία DSRC και με τη θολή κατάσταση ακόμη για το φάσμα που θα χρησιμοποιούν οι οχηματικές επικοινωνίες στην Αμερική, καταλαβαίνει κανείς πως είναι δύσκολη μια ενιαία και καθολική χρήση V2X στο άμεσο μέλλον.

Αν και μια υβριδική λύση (C-V2X – DSRC) θα μπορούσε να ήταν αποδεκτή για κάποιο χρονικό διάστημα, οι κυβερνήσεις και οι αρμόδιοι οργανισμοί θα πρέπει να συμφωνήσουν στα ανοιχτά θέματα ώστε να επιταχυνθεί η χρήση V2X στα οδικά

δίκτυα. Κίνηση προς αυτή τη κατεύθυνση αποτελεί το νέο πρόγραμμα αξιολόγησης αυτοκινήτων στην Ευρώπη (Euro NCAP – new car assessment program), το οποίο ανακοίνωσε πως στις αρχές του 2024 όλα τα αυτοκίνητα θα πρέπει να είναι εφοδιασμένα με V2X τεχνολογία, ώστε να αξιολογηθούν με 5 αστέρια ασφάλειας. Αυτό ίσως πιέσει τους αρμόδιους φορείς να πάρουν τις σχετικές αποφάσεις και να προχωρήσει η ανάπτυξη κι η εφαρμογή της V2X επικοινωνίας σύντομα.

- [1] P. K. Singh, S. K. Nandi, and S. Nandi, "A tutorial survey on vehicular communication state of the art, and future research directions," *Vehicular Communications*, vol. 18, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.vehcom.2019.100164.
- [2] N. Raza, S. Jabbar, J. Han, and K. Han, "Social Vehicle-To-Everything (V2X) communication model for Intelligent Transportation Systems based on 5G scenario," in *ACM International Conference Proceeding Series*, Association for Computing Machinery, Jun. 2018. doi: 10.1145/3231053.3231120.
- [3] B. Seungbok, K. Sangpil, H. Choulhee, K. Heeyoung, and K. Yoongi, "Design of a V2X Vehicle Antenna."
- [4] F. Arena and G. Pau, "An overview of vehicular communications," *Future Internet*, vol. 11, no. 2, Jan. 2019, doi: 10.3390/fi11020027.
- [5] R. Jurgen, *V2V/V2I Communications for Improved Road Safety and Efficiency*. : Warrendale, PA, USA: SAE, 2012. doi: 10.4271/pt-154.
- [6] H. Hartenstein, "INTRODUCTION TOPICS IN AD HOC AND SENSOR NETWORKS A Tutorial Survey on Vehicular Ad Hoc Networks," 2008.
- [7] A. Alalewi, I. Dayoub, and S. Cherkaoui, "On 5G-V2X Use Cases and Enabling Technologies: A Comprehensive Survey," *IEEE Access*, vol. 9. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 107710–107737, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3100472.
- [8] S. Sharma and B. Kaushik, "A survey on internet of vehicles: Applications, security issues & solutions," *Vehicular Communications*, vol. 20, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.vehcom.2019.100182.
- [9] Z. Machardy, A. Khan, K. Obana, and S. Iwashina, "V2X access technologies: Regulation, research, and remaining challenges," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 1858–1877, Jul. 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2808444.
- [10] M. Noor-A-Rahim *et al.*, "6G for Vehicle-to-Everything (V2X) Communications: Enabling Technologies, Challenges, and Opportunities," *Proceedings of the IEEE*, vol. 110, no. 6, pp. 712–734, Jun. 2022, doi: 10.1109/JPROC.2022.3173031.
- [11] "https://www.statista.com/statistics/262747/worldwide-automobile-production-since-2000/."
- [12] "Service Requirements for V2X Services," *3GPP Standard TS 22.185*, 2016.
- [13] S. E. El Ayoubi, "Deliverable D1.1: Refined scenarios and requirements, consolidated use cases, and qualitative technoeconomic feasibility assessment," *Mobile Wireless Commun.*

- Enablers Twenty twenty Inf. Soc.* Available: https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN_5G_White_Paper_V1_0.pdf, Jan. 2016.
- [14] 5GAA, "The Case for Cellular V2X for Safety and Cooperative Driving 5G Automotive Association." [Online]. Available: <https://5gaa.org/content/uploads/2017/10/5GAA-whitepaper-23-Nov-2016.pdf>
 - [15] N. M. Sadek, H. H. Halawa, R. M. Daoud, H. H. Amer, and N. A. Ali, "Heterogeneous LTE/Wi-Fi architecture for ITS traffic control and infotainment," in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, ESARS*, 2015. doi: 10.1109/ESARS.2015.7101458.
 - [16] K. Katsaros, M. Dianati, R. Tafazolli, and X. Guo, "End-to-end delay bound analysis for location-based routing in hybrid vehicular networks," *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 65, no. 9, 2016, doi: 10.1109/TVT.2015.2482362.
 - [17] K. Zheng, Q. Zheng, P. Chatzimisios, W. Xiang, and Y. Zhou, "Heterogeneous Vehicular Networking: A Survey on Architecture, Challenges, and Solutions," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, no. 4, 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2440103.
 - [18] Association of Radio Industries and Businesses, "Dedicated short-range communication system, version 1.0," Tokyo, Japan, 2001.
 - [19] "Amendment of parts 2 and 90 of the commissions rules to allocate the 5.850–5.925 GHz band to the mobile service for dedicated short range communications of intelligent transportation services," *ET Docket 98-95, FCC*, Washington, DC, USA, pp. 95–98, 1999.
 - [20] S. Bartoletti, B. M. Masini, V. Martinez, I. Sarris, and A. Bazzi, "Impact of the Generation Interval on the Performance of Sidelink C-V2X Autonomous Mode," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 35121–35135, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3061913.
 - [21] L. Armstrong and W. Fisher, "Status of Project IEEE 802.11 Task Group p, Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)," IEEE P802.11 Task Group. Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: https://www.ieee802.org/11/Reports/tgp_update.htm
 - [22] J. Wang, Y. Shao, Y. Ge, and R. Yu, "A survey of vehicle to everything (V2X) testing," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 2. MDPI AG, Jan. 02, 2019. doi: 10.3390/s19020334.
 - [23] A. Costandoiu and M. Leba, "Convergence of V2X communication systems and next generation networks," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Feb. 2019. doi: 10.1088/1757-899X/477/1/012052.
 - [24] "Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE): IEEE Draft Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Multi-Channel Operation; IEEE Std 1609.4-2016; IEEE: New York, NY, USA, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5551099>".

- [25] "IEEE 802.11p tutorial-802.11p,WAVE,DSRC protocol stack." Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.rfwireless-world.com/Tutorials/802-11p-WAVE-tutorial.html>
- [26] "Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems—5 GHz Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," *ASTM Standard 2213-03*, 2010.
- [27] W. Fisher, "Development of DSRC/WAVE Standards," *IEEE Press*, Annapolis, MD, USA, 2007.
- [28] 1609 WG, "Dedicated Short Range Communication Working Group. Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <http://standards.ieee.org/develop/wg/1609/>."
- [29] I. Radiocommunication Bureau, "Radio interface standards of vehicle-to-vehicle and vehicle-to-infrastructure two-way communications for Intelligent Transport System applications M Series Mobile, radiodetermination, amateur and related satellite services," 2019. Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2084-1-201911-1!!PDF-E.pdf
- [30] "Testing challenges for V2X Devices ..." Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.eenewseurope.com/en/testing-challenges-for-v2x-devices-2/>
- [31] R. Shrestha, S. Y. Nam, R. Bajracharya, and S. Kim, "Evolution of v2x communication and integration of blockchain for security enhancements," *Electronics (Switzerland)*, vol. 9, no. 9. MDPI AG, pp. 1–33, Sep. 01, 2020. doi: 10.3390/electronics9091338.
- [32] A. Haider and S. H. Hwang, "Adaptive transmit power control algorithm for sensing-based semi-persistent scheduling in C-V2X mode 4 communication," *Electronics (Switzerland)*, vol. 8, no. 8, Aug. 2019, doi: 10.3390/electronics8080846.
- [33] S. Zeadally, M. A. Javed, and E. Ben Hamida, "Vehicular Communications for ITS: Standardization and Challenges," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 11–17, Mar. 2020, doi: 10.1109/MCOMSTD.001.1900044.
- [34] G. Naik, B. Choudhury, and J. M. Park, "IEEE 802.11bd 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 70169–70184, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919489.
- [35] E. Moradi-Pari, D. Tian, M. Bahramgiri, S. Rajab, and S. Bai, "DSRC Versus LTE-V2X: Empirical Performance Analysis of Direct Vehicular Communication Technologies," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, no. 5, pp. 4889–4903, May 2023, doi: 10.1109/TITS.2023.3247339.

- [36] Aalto-yliopisto, International Federation for Information Processing, IEEE Communications Society, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Adaptive Semi-Persistent Scheduling for Enhanced On-road Safety in Decentralized V2X Networks*.
- [37] A. Nabil, V. Marojevic, K. Kaur, and C. Dietrich, "Performance Analysis of Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling in C-V2X Networks."
- [38] "CAR 2 CAR Communication Consortium," 2023. Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: https://www.car-2-car.org/fileadmin/documents/General_Documents/C2CCC_WP_2098_IEEE_802.11bd_TheV2XEvolution_V1.0.pdf
- [39] S. Ehsanfar, K. Moessner, A. Karim Gizzini, and M. Chafii, "Performance Comparison of IEEE 802.11p, 802.11bd-draft and a Unique-Word-based PHY in Doubly-Dispersive Channels," 2022. Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://hal.science/hal-03580225>
- [40] W. Zhuofei, S. Bartoletti, V. Martinez, and A. Bazzi, "Adaptive Repetition Strategies in IEEE 802.11bd V2X Networks," *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 72, no. 6, pp. 8262–8266, Jun. 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3241865.
- [41] M. Harounabadi, D. M. Soleymani, S. Bhadauria, M. Leyh, and E. Roth-Mandutz, "V2X in 3GPP Standardization: NR Sidelink in Release-16 and beyond," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 5, no. 1, pp. 12–21, Mar. 2021, doi: 10.1109/MCOMSTD.001.2000070.
- [42] "2018_5G_Americas_White_Paper_Cellular_V2X_Communications_Towards_5G_Final_for_Distribution".
- [43] D. Ficzer *et al.*, "Large-Scale Cellular Vehicle-to-Everything Deployments Based on 5G—Critical Challenges, Solutions, and Vision towards 6G: A Survey," *Sensors*, vol. 23, no. 16, Aug. 2023, doi: 10.3390/s23167031.
- [44] "<https://info-nrlte.com/tag/subcarrier-spacings/>."
- [45] Alejandro Correa (UMH) and Michele Rondinone (HMETC), "Transition Areas for Infrastructure-Assisted Driving D5.1 Definition of V2X message sets," 2018.
- [46] José Santa, Fernando Pereñíguez, Antonio Moragón, and Antonio F. Skarmeta, "Vehicle-to-Infrastructure Messaging Proposal Based on CAM/DENM Specifications," *Computer Science Faculty, University of Murcia, Murcia, 30100 Spain*.
- [47] ETSI, "TS 102 637-2 - V1.2.1 - Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service," 2011.

- [48] ETSI, "TS 102 637-3 - V1.1.1 - Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service," 2010.
- [49] "CEN TC 278." Accessed: Oct. 29, 2023. [Online]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/tc/cen/aa876bfe-1d4c-4f9a-8e50-2fcca8393dea/cen-tc-278>
- [50] Institute of Electrical and Electronics Engineers and IEEE ITSS, *2020 Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems (FISTS)*.
- [51] J. B. Kenney, "Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 7, 2011, doi: 10.1109/JPROC.2011.2132790.
- [52] M. Villarreal-Vasquez, B. Bhargava, and P. Angin, "Adaptable safety and security in V2X systems," in *Proceedings - 2017 IEEE 2nd International Congress on Internet of Things, ICIOT 2017*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Sep. 2017, pp. 17–24. doi: 10.1109/IEEE.ICIOT.2017.12.
- [53] V. Marojevic, "C-V2X Security Requirements and Procedures: Survey and Research Directions."
- [54] A. Ghosal and M. Conti, "Security issues and challenges in V2X: A Survey," *Computer Networks*, vol. 169, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2019.107093.
- [55] "How Re-Allocating the 5.9 GHz Band Could Affect Road Safety," *Kees Moerman, Vincent Martinez and Andrew Turley – NXP USA, Inc.*.
- [56] Charalampopoulos, Georgios, Tasos Dagiuklas, and Theofilos Chrysikos. "V2I applications in highways: How RSU dimensioning can improve service delivery." *2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*. IEEE, 2016.