



# ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## “ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕΣΩ ΓΡΑΜΜΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.”

Επιβλέπων Καθηγητής: Νικόλαος Μανουσάκης

Σπουδαστής: Θεόφιλος Π. Περδικέας

ΑΜ: 7913

*ΙΟΥΝΙΟΣ 2018*

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία αφιερώνεται στους γονείς μου.

Ευχαριστώ τους καθηγητές, τους συμφοιτητές και τα στελέχη της γραμματείας για την καθοδήγηση και την υπομονή τους, αλλά και όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίησή της με οποιονδήποτε τρόπο.

## Πίνακας περιεχομένων

### Contents

<b>ΙΟΥΝΙΟΣ 2018</b> .....	i
<b>Κεφάλαιο 1 : Μετάδοση Δεδομένων Μέσω Γραμμών Ηλεκτρικής Εγκατάστασης</b> .....	<b>9</b>
1.1 Εισαγωγή .....	9
1.2 Συχνά χρησιμοποιούμενοι όροι .....	9
1.3 Ιστορική Ανασκόπηση .....	10
1.4 Αναφορές .....	13
<b>Κεφάλαιο 2 : Χαρακτηρισμός Καναλιών</b> .....	<b>15</b>
2.1 Εισαγωγή .....	15
2.2 Θεμελιώδεις αρχές μοντελοποίησης καναλιών .....	15
2.3 Τοπολογίες χαμηλής, μέσης και υψηλής τάσης .....	19
2.4 Χαρακτηριστικά του καναλιού εσωτερικού χώρου στις ζώνες HF και VHF .....	20
2.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των προσεγγίσεων μοντελοποίησης .....	21
2.6 Αρχές μοντελοποίησης .....	22
2.7 Θόρυβος και παρεμβολή .....	26
2.8 Αναφορές .....	28
<b>Κεφάλαιο 3 : Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα</b> .....	<b>31</b>
3.1 Εισαγωγή .....	31
3.2 Παράμετροι για τις εκτιμήσεις EMC .....	32
3.3 Σύζευξη μεταξύ γραμμής ισχύος και άλλων συστημάτων επικοινωνιών μέσω καλωδίων .....	35
3.4 Χαρακτηρισμός της σύζευξης μεταξύ Γραμμής Ισχύος και Γραμμής Τηλεπικοινωνιών Μέσα στο Περιβάλλον Χώρου .....	36
<b>Κεφάλαιο 4 : Ζεύξη</b> .....	<b>39</b>
4.1 Εισαγωγή .....	39
4.2 Σύζευξη LV .....	44
4.3 Ζεύκτες N-PLC .....	45
4.3 Ζεύκτες B-PLC .....	47
4.4 Αντιστοιχία εμπέδησης .....	48
4.5 Σύζευξη φάσης προς φάση .....	50
4.6 Σύζευξη μονής φάσης .....	50
4.8 Αναφορές .....	51
<b>Κεφάλαιο 5 : PLC Για Αυτοματισμό Σπιτιού &amp; Βιομηχανίας</b> .....	<b>53</b>
5.1 Εισαγωγή .....	53
5.2 Αυτοματισμοί οικιακής και βιομηχανικής χρήσης με PLC .....	53
5.3 Δημοφιλή πρωτόκολλα αυτοματισμού σπιτιών .....	55
5.3.1 Πρωτόκολλο X10 .....	55
5.3 .1.1 Προδιαγραφή και μετάδοση φυσικού επιπέδου X10 .....	56
5.4 Περιορισμοί X10 .....	57
5.5 Πρότυπο KNX / EIB PL 110 Standard .....	57
5.6 Προδιαγραφή Layer Physical Data and Data Layer KNX PL 110 .....	58
5.7 KNX PL 110 Τοπολογία και αντιμετώπιση .....	60
5.8 KNX έναντι X10 .....	60
5.9 LONWorks .....	60
5.10 DigitalSTROM® .....	61
5.11 Αρχιτεκτονική και Εξαρτήματα DigitalSTROM .....	61
5.12 Εξαρτήματα και Εγκατάσταση δικτύου DigitalSTROM® PLC .....	62
5.13 Επικοινωνία DigitalSTROM® .....	63
5.14 Αναφορές .....	64

<b>Κεφάλαιο 6 : Συστήματα Πολυμέσων PLC .....</b>	<b>65</b>
6.1 Εισαγωγή.....	65
6.2 Απαιτήσεις QoS για κυκλοφορία πολυμέσων.....	65
6.2.1 Πολυμεσική δικτύωση στο σπίτι.....	66
6.3 Βελτιστοποίηση PLC για πολυμέσα .....	71
6.3.1 Γενικές εκτιμήσεις σχεδιασμού για PLC πολυμέσων .....	71
6.4 Πρότυπα για την ευρυζωνική τεχνολογία δικτύων PLC.....	73
6.5 Το πρότυπο IEEE 1901 Broadband Over Power Line .....	73
6.5.1 IEEE 1901 FFT-OFDM PHY .....	75
6.5.2 IEEE 1901 Wavelet-OFDM PHY .....	80
6.5.3 Το MAC και τα δύο PLCP.....	81
6.5.4 IEEE 1901 FFT-OFDM Έλεγχος Πρόσβασης Μέσου (MAC).....	82
6.5.5 Συνύπαρξη.....	89
6.6 Αξιολόγηση απόδοσης .....	94
6.6.1 Επιδόσεις πλαισίων MAC.....	94
6.6.2 Συνολική απόδοση MAC .....	94
6.7 HomePlug AV2.....	96
6.7.1 Εκτεταμένη ζώνη συχνότητας.....	96
6.7.2 Αποτελεσματική διάτρηση.....	97
6.7.3 Άμεση επανάληψη .....	97
6.7.4 Σύντομη οριοθέτηση και καθυστερημένη επιβεβαίωση .....	98
6.8 ITU-T G.996x (G.hn) .....	99
6.8.1 Επισκόπηση της αρχιτεκτονικής δικτύων G.9960 .....	100
6.8.2 Επισκόπηση της Φυσικής Στρώσης της ITU-T G.hn.....	104
6.8.3 Επισκόπηση του Layer Link Data του G.hn .....	107
6.9 Αναφορές.....	111
<b>Κεφάλαιο 7 : Συμπεράσματα .....</b>	<b>113</b>
<b>ΙΟΥΝΙΟΣ 2018 .....</b>	<b>114</b>

## Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Εικόνα της εξέλιξης της τεχνολογίας PLC.....	10
Σχήμα 2.1 (α) Μετρούμενη χρονική διακύμανση ενός εσωτερικού καναλιού ηλεκτρικής γραμμής. Η επιλεκτικότητα χρόνου εμφανίζεται με ρυθμό περιόδου, ενώ η εκλεκτικότητα συχνότητας εμφανίζει συσχέτιση σε διάφορες χρονικές στιγμές. (β) Κυματομορφή θορύβου που δημιουργείται από ένα φως αλογόνου με ρυθμιστή έντασης κατά τη διάρκεια ενός κυκλώματος δικτύου 60 Hz. ....	17
Σχήμα 2.2 Τυπικό κανάλι εσωτερικής γραμμής ισχύος μετρούμενο: (α) απόκριση παλμού. (β) λειτουργία μεταφοράς συχνότητας · (γ) ομαδική καθυστέρηση έναντι συχνότητας (η μέση καθυστέρηση ομάδας παρουσιάζεται ως έντονη γραφή).....	20
Σχήμα 2.3 Σχήμα εσωτερικού δικτύου PLC.....	23
Σχήμα 2.4 Δομικό μοντέλο για δίκτυο εσωτερικών γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας. ....	24
Σχήμα 2.5 Διάφορες πηγές θορύβου στα δίκτυα επικοινωνίας γραμμής ισχύος που παρεμβαίνουν στο σήμα επικοινωνίας σε ένα συγκεκριμένο δέκτη. [157] © 2012 IEEE. ....	27
Σχήμα 3.1 Εικονογράφηση του προβλήματος της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) με τη συσκευή PLC θύμα παρεμβολών.....	32
Σχήμα 3.2 Εικονογράφηση του προβλήματος της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας με δέκτη ραδιοσυχνότητας θύμα παρεμβολών.....	32
Σχήμα 3.3 Μερικές σημαντικές ποσότητες που χαρακτηρίζουν τη συμμετρία των δικτύων.....	34
Σχήμα 3.4 Στατιστικά στοιχεία TCL και TCTL για δίκτυα LV. ....	35
Σχήμα 4.1 Δομικό διάγραμμα συστήματος επικοινωνιών LV PLC που δείχνει θέσεις ζεύκτη. ....	40
Σχήμα 4.2 Δομικό διάγραμμα συστήματος επικοινωνιών HV PLC που δείχνει θέσεις ζεύξης και παγίδευσης γραμμών.....	42
Σχήμα 4.4 Δύο χωρητικά συζευγμένα μόντεμ που χρησιμοποιούνται σε ένα σύστημα PLC. ....	46
Σχήμα 4.5 Συζευγμένος συζεύκτης PLC με διατάξεις προστασίας και διαφορετικές αντιστάσεις εισόδου και εξόδου. ....	46
Σχήμα 4.6 Επαγωγείς που χρησιμοποιούνται στον συζεύκτη ηλεκτρικής γραμμής [27].....	47
Σχήμα 4.7 Μετρούμενες αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ως N-PLC. ....	48
Σχήμα 5.1 Εικόνα οικιακού αυτοματισμού με βάση το PLC. ....	54
Σχήμα 5.2 Χρονισμός μετάδοσης X10.....	56
Σχήμα 5.3 Κωδικοποίηση και μετάδοση X10. Οι αριθμοί είναι κύριοι κύκλοι.....	57
Σχήμα 5.4 Μετάδοση τηλεγράφων KNX.....	58
Σχήμα 5.5 KNX πλαίσιο LPDU.....	59
Σχήμα 5.6 Τηλεγράφημα απάντησης KNX.....	59
Σχήμα 5.7 Εικόνα της δομής του DigitalSTROM®.....	62
Σχήμα 6.1 Εννοιολογική επισκόπηση του IEEE 1901. ....	74
Σχήμα 6.2 Πομποδέκτης FFT-OFDM IEEE 1901.....	76
Σχήμα 6.3 Αρχιτεκτονική δικτύου FFT-OFDM IEEE 1901.....	82
Σχήμα 6.4 Περίοδος δομής Beacon.....	85
Σχήμα 6.5 Δραστηριότητα μέσου στην κατανομή TDMA.....	87
Σχήμα 6.6 Δραστηριότητα μέσου στην κατανομή CSMA. ....	88
Σχήμα 6.7 Παράθυρο χρόνου ISP, πεδία ISP, περιθώρια πεδίου ISP και παράθυρο ISP. [22] © 2008 IEEE. ....	91
Σχήμα 6.8 (α) Γενική δομή TDMA: N TDMU σε μια περίοδο κατανομής και S TDM Slots ανά TDMU (ένα TDMU είναι δύο κύκλοι μακρής). (β) Εικονογράφηση τριών πιθανών TDMU για την περίπτωση του S = 12: (Ανω) οι TDMs κατανέμονται κατά 50% στο σύστημα πρόσβασης και 50% στα εσωτερικά συστήματα (25% στα συστήματα Wavelet-OFDM και 25% Τα συστήματα FFT-OFDM (Center) τα TDMs κατανέμονται κατά 50% στα συστήματα Wavelet-OFDM και 50% στα συστήματα FFT-OFDM, δεδομένου ότι δεν υπάρχει σύστημα πρόσβασης, (Κάτω) ίδιο με την κεντρική περίπτωση αλλά για διαφορετική κατάσταση δικτύου για την περίπτωση που τα συστήματα Wavelet χρειάζονται μειωμένους πόρους στο κατάλληλο πεδίο ISP [22] © 2008 IEEE. ....	93
Σχήμα 6.9 Απόδοση IEEE 1901 FFT-OFDM για SDTV 6-Mbps σε διάφορους ρυθμούς σφάλματος PB.....	95
Σχήμα 6.10 Μοντέλο δικτύου G.9960, δομή τομέα και μοντέλο αναφοράς πρωτοκόλλου ενός κόμβου. [28]© 2009 IEEE. ....	101
Σχήμα 6.11 Παράδειγμα τοπολογίας HN που σχετίζεται με την κατοικημένη πρόσβαση. [28] © 2009 IEEE.....	102
Σχήμα 6.12 Ζώνες ζωνών G.9960. Ο αριθμός των υπο-φορέων OFDM που χρησιμοποιούνται για κάθε μέσο και εύρος ζώνης παρουσιάζεται επίσης. [28] © 2009 IEEE. ....	104
Σχήμα 6.13 Μορφή του πλαισίου μετάδοσης. [28] © 2009 IEEE.....	106
Σχήμα 6.14 Πρόσβαση πολυμέσων G.9960 (το TXOP1 εκχωρείται ως CFTXOP, TXOP2 και TXOPn ορίζονται ως STXOP και το TXOPn-1 εκχωρείται ως CBTXOP).....	109

## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 3. 1 Διαφορετικοί τύποι ζεύξης.....	36
Πίνακας 5. 1 Επισκόπηση των προτύπων PLC οικιακού και βιομηχανικού αυτοματισμού.....	55
Πίνακας 6. 1 Απαιτήσεις Bandwidth και QoS για εφαρμογές πολυμέσων.....	67

Λίστα Ακρωνυμίων

AC	Alternating Current	IPTV	Internet Protocol Television
ACF	Autocorrelation Function	ISI	Inter-symbol Interference
ACG	Average Channel Gain	ISN	Impedance Stabilization Network
AF	Amplify-and-forward	ISP	Inter-system Protocol
AM	Amplitude Modulation	ITU	International Telecommunication Union
AMI	Advanced Metering Infrastructure	LAN	Local Area Network
AMN	Artificial Mains Network	LCL	Longitudinal Conversion Loss
AMR	Automatic Meter Reading	LDCU	Low Data Rate Central Control Unit
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses	LDPC	Low-density Parity-check
AU	Allocation Unit	LDR	Low Data Rate
AVLN	AV Logical Network	LLR	Log-likelihood Ratio
AWGN	Additive White Gaussian Noise BB Broadband	LMS	Least Mean Square
BER	Bit Error Ratio	LP	Linear Programming
BPL	Broadband Over Power Lines	LPTV	Linear Periodically Time Variant
B-PLC	Broadband PLC	LTI	Linear Time Invariant
BPRS	Binary Pseudo-random Sequence	LV	Low Voltage, 110 V to 400 V
BPSK	Binary Phase-shift Keying	LVDC	Low-voltage Direct Current
BS	Base Station	MAC	Medium Access Control
CA-Msg	Channel Announcement Message	MAI	Multiple Access Interference
CAN	Controller Area Network	MC	Multicarrier
CB-FMT	Cyclic Block Filtered Multitone Modulation	MDCU	Multiple Data Rate Central Control Unit
CCDF	Complementary Cumulative Distribution Function	MDU	Multi Dwelling Unit
CCo	Central Coordinator	MF	Matched Filter
CDCF	Commonly Distributed Coordination Function	MIMO	Multiple-input Multiple-output
CDF	Cumulative Distribution Function	MLD	Maximum-likelihood Detection
CDMA	Code Division Multiple Access	MMSE	Minimum Mean Square Error
CE	Comite' Europe'enne	MMU	Master Monitoring Unit
CEI	Customer-end Inverter	MTL	Multi-conductor Transmission Line
CENELEC	Comite' Europe'enne de Normalisation Electrotechnique	MV	Medium Voltage, 7.2 kV to 33 kV
CFP	Contention Free Period	MWR	Multi-way Relaying
CFR	Channel Frequency Response	NB	Narrowband
CISPR	International Special Committee on Radio Interference	OAF	Opportunistic AF
CM	Common Mode or Connection Manager	ODF	Opportunistic DF
CP	Cyclic Prefix or Contention Period	OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CPE	Customer Premise Equipment	OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
CRC	Cyclic Redundancy Check	OH	Overhead
CSI	Channel State Information	OOB	Out of Band
CSMA	Carrier Sense Multiple Access	OOK	On-off Keying
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance	OPERA	Open PLC European Research Alliance
DBPSK	Binary DPSK	OQAM	Offset Quadrature Amplitude Modulation
DCA	Dynamic Channel Allocation	OSI	Open Systems Interconnection
DCT	Discrete Cosine Transform	OSTBC	Orthogonal Space-time Block Codes
DF	Decode-and-Forward	PAM	Pulse Amplitude Modulation
DFT	Discrete Fourier Transform	PDF	Probability Density Function
DLL	Data Link Layer	PHY	Physical
DM	Differential Mode or Domain Master	PLC	Power Line Communication
DPSK	Differential Phase Shift Keying	PLCP	Physical-layer Convergence Protocol
DQPSK	Quaternary DPSK	PoE	Power over Ethernet
DSL	Digital Subscriber Line	PR	Perfect Reconstruction
DSM	Demand Side Management	PSD	Power Spectral Density
DSSS	Direct Sequencing Spread Spectrum	PSK	Phase Shift Keying
DSTBC	Distributed Space-time Block Codes	PTC	Positive Temperature Coefficient
DT	Direct Transmission	PVC	Polyvinylchloride
DWMT	Discrete Wavelet Multitone	QAM	Quadrature Amplitude Modulation
EC	European Commission	QC-LDPC	Quasi-cyclic Low-density Parity-check
ECC	Error Correction Code	QoS	Quality of Service
ECU	Electronic Controlled Unit	RF	Radio Frequency
EIB	European Installation Bus	RMS-DS	Root-mean-square Delay Spread
EMC	Electromagnetic Compatibility	ROBO	Robust Modulation
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	RS	Reed-Solomon
EU	European Union	RX	Receiver
EUT	Equipment Under Test	SFN	Single Frequency Networking
EV	Electric Vehicle	SINR	Signal-to-noise and Interference Ratio
FB	Filter Bank	SISO	Single-input Single-output
FCC	Federal Communications Commission	SNR	Signal-to-noise Ratio
FD	Frequency Domain	SST	Spread Spectrum Techniques
FDMA	Frequency Division Multiple Access	STBC	Space-time Block Coding
FEC	Forward Error Correction	STFT	Short Time Fourier Transform
FFT	Fast Fourier Transform	SVD	Singular Value Decomposition
FH	Frequency Hopping	TCL	Transverse Conversion Loss
FIR	Finite Impulse Response	TCTL	Transverse Conversion Transfer Loss
FMT	Filtered Multitone	TDM	Time Division Multiplex
FSK	Frequency-shift Keying	TDMA	Time Division Multiple Access
HDCU	High Data Rate Central Control Unit	TEM	Transverse Electromagnetic
HD-PLC	High-definition Power Line Communication	TF	Time Frame
HDR	High Data Rate	T-ISN	T-shaped Impedance Stabilization Network
HDTV	High Definition Television	TL	Transmission Line
HF	High-frequency	TS	Time Slot
HPAV	HomePlug AV	TWR	Two-way Relaying
HV	High Voltage, 66 kV and above	TX	Transmitter
ICI	Inter-carrier Interference	TXOP	Transmission Opportunities
IDFT	Inverse DFT	UDP	User Datagram Protocol
IEC	International Electrotechnical Commission	UPA	Universal Powerline Association
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform	UTP	Unshielded Twisted Pair
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistors	UWB	Ultra Wide Band
IH	In-home	VDSL	Very High Bit Rate Digital Subscriber Line
IN	Impulse Noise	VLF	Very Low Frequency
INL	Interfering Network List	VoIP	Voice Over Internet Protocol
IP	Internet Protocol or Integer Programming	WLAN	Wireless Local Area Network

## Περίληψη

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η θεωρητική εκτίμηση της μετάδοσης δεδομένων μέσω αγωγών ηλεκτρικής εγκατάστασης.

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην αναγκαιότητα, στους συχνά χρησιμοποιούμενους όρους και στην ιστορική διαδρομή του PLC . Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο μελετάται ο χαρακτηρισμός και η μοντελοποίηση του ραδιοφωνικού διαύλου. Ακολουθεί στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) που αποτελεί σημαντικό και μη τετριμμένο στοιχείο για την ανάπτυξη και λειτουργία συστημάτων επικοινωνίας γραμμής ισχύος. Στη συνέχεια στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο, εξετάζουμε τη σύνδεση των σημάτων επικοινωνίας γραμμής ισχύος (PLC) προς και από τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλής τάσης (LV). Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην αυτοματισμό του σπιτιού και της βιομηχανίας, τέλος στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο υπάρχει εκτεταμένη μελέτη σχετικά με την παροχή επικοινωνίας πολυμέσων χρησιμοποιώντας τις υπάρχουσες ηλεκτρικές καλωδιώσεις μέσα στο σπίτι και στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο υπάρχει αναφορά συμπερασμάτων που προέκυψαν από την εργασία.

Λέξεις κλειδιά: PLC, Χαρακτηρισμός Καναλιών, EMC, Ζεύξη,

Αυτοματισμός, PLC Πολυμέσα



## Abstract

The purpose of the thesis is the theoretical estimation of data transmission via electrical installation pipes.

In Chapter 1 reference is made to the necessity, the frequently used terms and the historical PLC path. In the second chapter we study the characterization and the modeling of the radio channel. In the third chapter, Electromagnetic Compatibility (EMC) is an important and non-trivial element for the development and operation of power line communication systems. Then in Chapter 4, we examine the connection of PLCs to and from Low Voltage (LV) power lines. In Chapter 5, reference is made to automation of home and industry, finally in Chapter 6 there is an extensive study on by providing multimedia communication using existing electrical wiring inside the home and in Chapter 7 there is a report of conclusions that emerged from the study.

Keywords: PLC, Channel Characterization, EMC, Coupling, Automation, PLC Multimedia.



# Κεφάλαιο 1 : Μετάδοση Δεδομένων Μέσω Γραμμών Ηλεκτρικής Εγκατάστασης

## 1.1 Εισαγωγή

Με την παρούσα εργασία, επιχειρείται η μελέτη του τρόπου μεταφοράς δεδομένων μέσω των γραμμών ηλεκτρικού ρεύματος.

Η τεχνολογική ανάπτυξη στην εποχή μας και η καταγιστική σε ρυθμούς δημιουργία νέων εφαρμογών μεγάλης πολυπλοκότητας, καθιστά την βελτιστοποίηση των τηλεπικοινωνιών πρωταρχική ανάγκη.

Μπορούμε να κατανοήσουμε πως, οι επικοινωνίες μέσω γραμμής ηλεκτρικού ρεύματος, (Power Line Communications), είναι τεχνολογία που χρησιμοποιεί το υπάρχον δίκτυο για τη μεταφορά των δεδομένων η οποία καθίσταται απολύτως συμφέρουσα διότι δεν απαιτεί νέα επένδυση για τη δημιουργία δικτύου τηλεπικοινωνιών.

Ουσιαστικά με την επαναχρησιμοποίηση υφιστάμενων υποδομών (δηλαδή γραμμές ηλεκτρικού ρεύματος), των οποίων πρωταρχικός στόχος είναι η παροχή AC (50 Hz ή 60 Hz) ή DC ηλεκτρικής ενέργειας, επιτυγχάνουμε τους σκοπούς της επικοινωνίας δεδομένων.

Σε σύγκριση με τη ηλεκτρικό «σήμα», το PLC χρησιμοποιεί σήματα υψηλής συχνότητας με στοιχεία συχνότητας ξεκινώντας από μερικές εκατοντάδες Hz έως μερικές εκατοντάδες MHz. Ο πλουραλισμός των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για PLC σχετίζεται με διαφορετικές εφαρμογές που υποστηρίζονται από το PLC και τις απαιτήσεις τους.

## 1.2 Συχνά χρησιμοποιούμενοι όροι

Πριν από την εκπόνηση περαιτέρω σχετικά με αυτό, εν συντομία ελέγχουμε την ορολογία που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το PLC.

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες ορολογίες συνοψίζονται παρακάτω.:

Carrier-current systems: (Συστήματα μεταφοράς ρεύματος). Αυτός ο όρος αναφέρεται στο γεγονός ότι μεταδίδονται σήματα δεδομένων διαμορφωμένα από φορέα μέσω γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Έχει συχνά χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει συλλογικά σχετικά στενής ζώνης σήματα με συχνότητες κάτω από 500 kHz.

Power line carrier: (Φορέας μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας) Παρόμοια με τα συστήματα μεταφοράς-ρεύματος, αυτή είναι μια πρώιμη ορολογία που χρησιμοποιείται για συστήματα που μεταδίδουν σήματα διαμορφωμένα από φορέα μέσω γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, λόγω προηγούμενης χρήσης, αναφέρεται συνήθως σε συστήματα που λειτουργούν σε συχνότητες κάτω από 500 kHz.

Distribution line carrier (DLC): (Φορέας γραμμής διανομής): Το DLC αναφέρεται σε

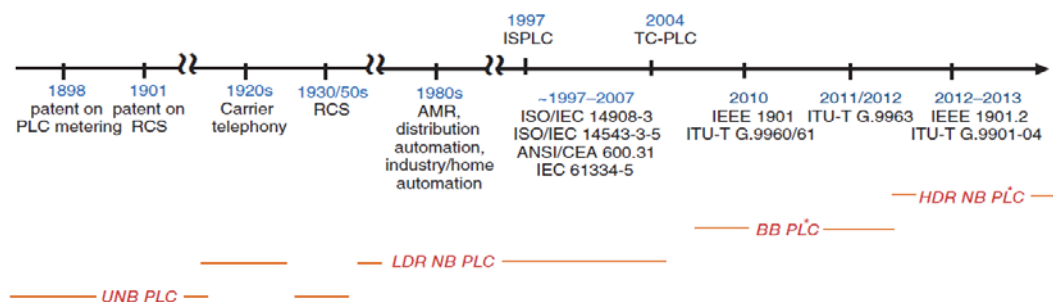
συστήματα επικοινωνίας γραμμής ισχύος που εξυπηρετούν εφαρμογές στον τομέα της διανομής. Λόγω των πολλών ασυνεχειών γραμμών και κλάδων στο δίκτυο διανομής, τα συστήματα DLC αντιμετωπίζουν ένα πιο δύσκολο περιβάλλον επικοινωνίας από τα συστήματα επικοινωνίας γραμμής ισχύος που λειτουργούν στο τμήμα μετάδοσης του ηλεκτρικού δικτύου. Το DLC περιγράφει συνήθως συστήματα που χρησιμοποιούν συχνότητες κάτω από 500 kHz.

**Broadband over power lines (BPL):** (Ευρυζωνικότητα μέσω γραμμών μεταφοράς ενέργειας): Η BPL είναι μια πιο πρόσφατη ορολογία που αναφέρεται σε συστήματα που λειτουργούν στην περιοχή συχνοτήτων από περίπου 2 MHz έως 30 MHz και πέραν αυτών, με εύρος ζώνης σήματος δεκάδων MHz και με ταχύτητες δεδομένων που κυμαίνονται από μερικά Mbps έως εκατοντάδες Mbps., εξ ου και ο όρος «ευρυζωνική». Η εφαρμογή των συστημάτων BPL είναι κυρίως στο τμήμα διανομής του δικτύου, προκειμένου να καταστεί δυνατή η ευρυζωνική πρόσβαση, καθώς και η επικοινωνία στο σπίτι.

**Power line telecommunications (PLT):** (Τηλεπικοινωνίες γραμμής ισχύος): Αυτός ο όρος χρησιμοποιείται παρόμοια με τη BPL, αλλά είναι περισσότερο δημοφιλής στις ευρωπαϊκές χώρες. Για παράδειγμα, το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI) παρήγαγε πολυάριθμες εκθέσεις και προδιαγραφές για την «PLT» μέσω της «Τεχνικής Επιτροπής Ηλεκτρονικών Τηλεπικοινωνιών (PLT) της Τεχνικής Επιτροπής ETSI».

### 1.3 Ιστορική Ανασκόπηση

Το Σχήμα 1.1 απεικονίζει την εξέλιξη της τεχνολογίας PLC, προσδιορίζοντας κάποιες πρόωρες ευρεσιτεχνίες, συγκεκριμένους τομείς εφαρμογής και διεθνή πρότυπα κατά μήκος ενός χρονοδιαγράμματος.



Σχήμα 1.1 Εικόνα της εξέλιξης της τεχνολογίας PLC.

Η προέλευση του PLC μπορεί να ανιχνευθεί στα τέλη του 1800 και στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας [11] και [12] εξετάζουν την απομακρυσμένη ανάγνωση μετρητών μέσω PLC (βλ. [13]). Η πρώτη περιγραφή της διαχείρισης απομακρυσμένου φορτίου με τη χρήση PLC ή ο λεγόμενος έλεγχος κυμάτωσης δίνεται στο [14] (παρατηρούμε ότι [15] αναφέρει την ελαφρά προηγούμενη υποβολή διπλώματος ευρεσιτεχνίας [16]).

Αυτά τα συστήματα ελέγχου κυμάτωσης (RCS) αναπτύχθηκαν περαιτέρω στη δεκαετία του 1930 [17] και σε μεγαλύτερη κλίμακα στη δεκαετία του 1950 [18] για να καθιερώσουν μονοκατευθυντική επικοινωνία για τη διαχείριση φορτίου και άλλες λειτουργίες ελέγχου στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Το RCS χρησιμοποιεί σήματα PLC υψηλής ισχύος και στενής ζώνης. Οι συχνότητες σήματος είναι μεταξύ 125 Hz και 3 kHz, έτσι ώστε τα σήματα να μπορούν να περάσουν από τους μετασχηματιστές διανομής και να φτάσουν στους καταναλωτές. Πριν από την ευρεία χρήση του PLC μέσω ελέγχου κυμάτων στον τομέα διανομής, η φωνητική επικοινωνία ηλεκτρικής γραμμής μέσω γραμμών μετάδοσης μέσης τάσης και υψηλής τάσης έγινε δημοφιλής στη δεκαετία του 1920 [19]. Αυτά τα συστήματα λειτουργούν με τη συχνότητα να κυμαίνεται από περίπου 15 kHz έως 500 kHz και χρησιμοποιεί εύρος ζώνης σήματος μερικών kHz.

Αργότερα, η προστατευτική αναμετάδοση έχει γίνει μια σημαντική εφαρμογή για αυτούς τους τύπους συστημάτων [20]. Η αμφίδρομη επικοινωνία μέσω καλωδίων αναπτύχθηκε περαιτέρω στη δεκαετία του 1980 με συστήματα PLC που σχεδιάστηκαν για την αυτόματη ανάγνωση μετρητών (AMR) και την αυτοματοποίηση στο δίκτυο διανομής, καθώς και για τη βιομηχανία και τον αυτοματισμό των κτιρίων [6,18]. Η εγκατάσταση αυτών των συστημάτων διευκολύνθηκε από τη δημοσίευση του ευρωπαϊκού προτύπου EN 50065 «Σήμανση ηλεκτρικών εγκαταστάσεων χαμηλής τάσης στην περιοχή συχνοτήτων 3 kHz έως 148,5 kHz» το 1991. Όλα τα συστήματα PLC που αναφέρονται μέχρι τώρα εμπίπτουν στις κατηγορίες UNB και LDR NB PLC (βλ. Σχήμα 1.1). Η πρώτη ορίζεται ότι λειτουργεί κάτω των 3 kHz και παρέχει ταχύτητες δεδομένων της τάξης των 100 bps, ενώ οι τελευταίες λειτουργούν μεταξύ 3 kHz και 500 kHz με ρυθμούς δεδομένων λίγων kbps [6]. Αυτό άλλαξε στα τέλη της δεκαετίας του 1990, καθώς οι εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας θεωρούσαν ότι προσέφεραν πρόσθετες υπηρεσίες στους καταναλωτές μέσω των γραμμών τους, ως αποτέλεσμα της απελευθέρωσης των αγορών τηλεπικοινωνιών και ενέργειας στην Ευρώπη. Τα ευρυζωνικά συστήματα PLC που χρησιμοποιούν ζώνες συχνοτήτων μεταξύ περίπου 1,8 MHz έως 250 MHz και παρέχουν ταχύτητες δεδομένων που κυμαίνονται από αρκετά Mbps έως αρκετές εκατοντάδες Mbps [6] αναπτύχθηκαν και αναπτύχθηκαν για πρόσβαση στο Internet και εφαρμογές πολυμέσων στο σπίτι. Η εισαγωγή του BB PLC συνοδεύτηκε από ραγδαία αύξηση των ερευνητικών δραστηριοτήτων, όπως προκύπτει από το πρώτο ISPLC1 το 1997, από ειδικά θέματα σε περιοδικά και περιοδικά [22-26], βιβλία [27] και τη δημιουργία των IEEE Communications Κοινωνία TC-PLC το 2004 (βλ. Σχήμα 1.1). Οι προδιαγραφές για τα συστήματα PLC BB ενσωματώθηκαν στα πρότυπα IEEE 1901 [28] και ITU-T G.9960 / 61 [29, 30] το 2010.

Ένα δεύτερο κύμα καινοτομίας στις αρχές της δεκαετίας του 2000 άλλαξε την εστίαση

πίσω στο NB PLC. Με το όραμα "Smart Grid" να διαμορφώνεται, ήταν φυσικό τα βοηθήματα ηλεκτρικής ενέργειας να θεωρούν το PLC ως μέσο για την επίτευξη αποτελεσματικής και αξιόπιστης επικοινωνιακής υποδομής [6]. Ενώ οι λύσεις NB PLC ήταν διαθέσιμες για την παροχή, για παράδειγμα, βασικών υπηρεσιών AMR, υιοθετήθηκαν με επιτυχία οι μέθοδοι μετάδοσης που χρησιμοποιήθηκαν στην BB PLC για μια νέα τάξη συστημάτων PLC HDR NB που υποστηρίζουν μετάδοση μεταξύ δεκάδων kbps και περίπου 500 kbps [6]. Οι προδιαγραφές του συστήματος για το HDR NB PLC έχουν δημοσιευθεί στα πρότυπα ITU-T G.9901-9904 [31-34] και IEEE 1901.2 [35] το 2012 και το 2013, αντίστοιχα. Οι εφαρμογές έξυπνων δικτύων έχουν γίνει ένας από τους κύριους κινητήριους μοχλούς καινοτομίας τόσο για το HDR NB όσο και για το BB PLC, με δημοσιεύσεις (π.χ. [6, 36, 37]) συνεδρίες και επιτροπές αφιερωμένες σε αυτό το θέμα.

Τα σύγχρονα συστήματα PLC χρησιμοποιούν τις τελευταίες τεχνικές επεξεργασίας σημάτων, συμπεριλαμβανομένων προηγμένων εννοιών, όπως η διαμόρφωση πολλαπλών φορέων με προσαρμοστική διάκενση και η πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) [38, 39], τα οποία έχουν ήδη υιοθετηθεί στα διεθνή πρότυπα [40] [41] (βλ. Σχήμα 1.1). Αυτό δείχνει ότι η τεχνολογία PLC του σήμερα είναι ίδια με αυτή που χρησιμοποιείται για τα σύγχρονα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας και επικοινωνίας σε σχέση με άλλα ενσύρματα μέσα. Ωστόσο, δεδομένου ότι το PLC λειτουργεί πάνω από «ζωντανά καλώδια», υπάρχουν ξεχωριστά χαρακτηριστικά στην τεχνολογία PLC που δεν υπάρχει για άλλα μέσα.

Ένα παράδειγμα είναι η αποτελεσματική και ασφαλής σύζευξη των σημάτων από και προς τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία απαιτεί ειδικές εκτιμήσεις, για παράδειγμα μέσω προτύπων όπως [42].

## 1.4 Αναφορές

1. U.S. Federal Communications Commission (FCC), Code of Federal Regulations, Title 47, Part 15 (47 CFR 15), Sep. 19, 2005.
2. AIEE Committee Report, Guide to application and treatment of channels for power-line carrier, *AIEE Trans. Power App. Syst.*, 73(1), 417–436, Jan. 1954.
3. Power System Communications Committee, Summary of an IEEE guide for power-line carrier applications, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, 99(6), 2334–2337, Nov. 1980.
4. IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC). [Online]. Available: <http://www.isplc.org>
5. IEEE Communications Society Technical Committee on Power Line Communications. [Online]. Available: <http://committees.comsoc.org/plc/>
6. S. Galli, A. Scaglione, and Z. Wang, For the grid and through the grid: The role of power line communications in the smart grid, *Proc. IEEE*, 99(6), 998–1027, Jun. 2011.
7. M. K. Lee, R. E. Newman, H. A. Latchman, S. Katar, and L. Yonge, HomePlug 1.0 powerline communication LANs — protocol description and performance results, *Int. J. Commun. Syst.*, 16(5), 447–473, May 2003.
8. G. Bumiller and M. Deinzer, Narrow band power-line chipset for telecommunication and internet application, in *Proc. Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Malmö, Sweden, Apr. 4–6, 2001, 353–358.
9. I. Berganza, A. Sendin, and J. Arriola, PRIME: Powerline intelligent metering evolution, in *IET CIRED Seminar: SmartGrids for Distribution*, Frankfurt, Germany, Jun. 23–24, 2008, 3–4.
10. K. Razazian, M. Umari, and A. Kamalizad, Error correction mechanism in the new G3-PLC specification for powerline communication, in *Proc. IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Rio de Janeiro, Brazil, Mar. 28–31, 2010, 50–55.
11. J. Routin and C. E. L. Brown, Improvements in and relating to electricity meters, British Patent GB 189 724 833, Oct. 1898.
12. C. H. Thordarson, Electric central station recoding mechanism for meters, U.S. Patent US 784 712, Mar. 1905.
13. P. A. Brown, Power line communications — Past present and future, in *Proc. Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Lancaster, UK, Mar. 30–Apr. 1, 1999, 1–8.
14. C. R. Loubery, Improved method of telegraphing, indicating time, or actuating mechanism electrically, British Patent GB 190 000 138, Jan. 1901.
15. J. Fritz. (2011, Sep.) Rundsteuertechnik. Accessed: March 2015. [Online]. Available: <http://www.rundsteuerung.de/>
16. C. R. Loubery, Einrichtung zur elektrischen Zeichengebung an die Teilnehmer eines Startstromnetzes, German Patent Nr. 118 717, Mar. 1901.
17. K. Dostert, *Powerline Communications*. Prentice Hall, 2001.
18. D. Dzung, I. Berganza, and A. Sendin, Evolution of powerline communications for smart distribution: From ripple control to OFDM, in *Proc. IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Udine, Italy, Apr. 3–6, 2011, 474–478.
19. M. Schwartz, Carrier-wave telephony over power lines: Early history, *IEEE Commun. Mag.*, 47(1), 14–18, Jan. 2009.
20. IEEE guide for power-line carrier applications, IEEE Standards Association, Standard 643-2004, 2005.
21. PLC DocSearch. [Online]. Available: <http://www.isplc.org/docsearch/>
22. H. A. Latchman and L. W. Yonge (Guest Editors), Power line local area networking, *IEEE Commun. Mag.*, 31(4), 32–33, Apr. 2003.
23. S. Galli, A. Scaglione, and K. Dostert (Guest Editors), Broadband is power: Internet access through the power line network, *IEEE Commun. Mag.*, 31(5), 82–83, May 2003.
24. F. N. Pavlidou, H. A. Latchman, A. J. H. Vinck, and R. E. Newman (Guest Editors), Powerline communications and applications, *Int. J. Commun. Syst.*, 16(5), 357–361, Jun. 2003.
25. E. Biglieri, S. Galli, Y.-W. Lee, H. V. Poor, and A. J. H. Vinck (Guest Editors), Special issue on power line communications, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 24(7), 1261–1266, Jul. 2006.
26. M. V. Ribeiro, L. Lampe, K. Dostert, and H. Hrasnica (Guest Editors), Special issue on advanced signal processing and computational intelligence techniques for power line communications, *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2007, article ID 45812, 3 pp.
27. H. Hrasnica, A. Haidine, and R. Lehnert, *Broadband Powerline Communications Networks: Network Design*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2004.

28. IEEE standard for broadband over power line networks: Medium access control and physical layer specifications, IEEE Standards Association, IEEE Standard 1901-2010, Sep. 2010. [Online]. Available: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1901-2010.html>
29. Unified high-speed wire-line based home networking transceivers – system architecture and physical layer specification, ITU-T, Recommendation G.9960, 2011. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9960>
30. Unified high-speed wire-line based home networking transceivers – data link layer specification, ITU-T, Recommendation G.9961, 2014. [Online]. Available: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9961>
31. Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers – power spectral density specification, ITU-T, Recommendation G.9901, Nov. 2012. [Online]. Available: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9901-201211-I/en>
32. Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for ITU-T G.hnem networks, ITU-T, Recommendation G.9902, Oct. 2012. [Online]. Available: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9902>
33. Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for G3-PLC networks, ITU-T, Recommendation G.9903, May 2013. [Online]. Available: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9903>
34. Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for PRIME networks, ITU-T, Recommendation G.9904, Oct. 2012. [Online]. Available: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9904-201210-I/en>
35. IEEE standard for low-frequency (less than 500 kHz) narrowband power line communications for smart grid applications, IEEE Standards Association, IEEE Standard 1901.2-2013, Dec. 2013. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/1901.2-2013.html>
36. L. Lampe, A. M. Tonello, and D. Shaver (Guest Editors), Power line communications for automation networks and smart grid, *IEEE Commun. Mag.*, 49(12), 26–27, Dec. 2011.
37. J. Anatory, M. V. Ribeiro, A. M. Tonello, and A. Zeddani (Guest Editors), Special issue on power-line communications: Smart grid, transmission, and propagation, *J. Electric. Comput. Eng.*, article ID 948598, 2 pp., 2013.
38. A. Schwager, Powerline communications: Significant technologies to become ready for integration, Ph.D. dissertation, University of Duisburg-Essen, Germany, 2010. [Online]. Available: [http://plc.ets.uni-duisburg-essen.de/Schwager\\_Andreas\\_Diss.pdf](http://plc.ets.uni-duisburg-essen.de/Schwager_Andreas_Diss.pdf)
39. L. T. Berger, A. Schwager, P. Pagani, and D. M. Schneider, MIMO power line communications, *IEEE Commun. Surveys Tutorials*, 17(1), 106–124, First Quarter 2015.
40. Unified high-speed wire-line based home networking transceivers – multiple input/multiple output specification, ITU-T, Recommendation G.9963, 2011.
41. L. Yonge, J. Abad, K. Afkhamie, L. Guerrieri, S. Katar, H. Lioe, P. Pagani, R. Riva, D. M. Schneider, and A. Schwager, An overview of the HomePlug AV2 technology, *J. Electric. Comput. Eng.*, article ID 892628, 20 pp., 2013.
42. IEEE standard for broadband over power line hardware, IEEE Standards Association, Standard 1675-2008, 2008.
43. H. C. Ferreira, L. Lampe, J. E. Newbury, and T. G. Swart, Eds., *Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines*, 1st ed. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2010.



## Κεφάλαιο 2 : Χαρακτηρισμός Καναλιών

### 2.1 Εισαγωγή

Από όλες τις ερευνητικές δραστηριότητες που έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια, αυτές που περιλαμβάνουν τον χαρακτηρισμό και τη μοντελοποίηση του ραδιοφωνικού διαύλου είναι από τις πιο σημαντικές. Δηλαδή ο δίαυλος διάδοσης είναι ο βασικός παράγοντας που συμβάλλει σε πολλά προβλήματα και περιορισμούς που συναντούν τα συστήματα επικοινωνίας γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας (PLC).

Η αναφορά στα κινητά ραδιοσυστήματα είναι πολύ κατάλληλη εδώ. Οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας δεν έχουν «σχεδιαστεί» για τη μεταφορά σημάτων επικοινωνίας και, συνεπώς, τα ασύρματα και τα κανάλια PLC μοιράζονται μια σειρά χαρακτηριστικών που επηρεάζουν το σχεδιασμό και την απόδοση του συστήματος επικοινωνίας.

Αυτό το κεφάλαιο έχει σκοπό να παρέχει μια επισκόπηση της κατάστασης της τεχνολογίας στον χαρακτηρισμό καναλιών για το PLC. Με τον τρόπο αυτό, δίνουμε ιδιαίτερη προσοχή σε συγκεκριμένα μοντέλα για τη λειτουργία καναλιών μεταφοράς και τον χαρακτηρισμό των διαταραχών σε διαφορετικά PLC περιβάλλοντα.

Πιο συγκεκριμένα θα ασχοληθούμε με μια επισκόπηση των βασικών τοπολογιών της γραμμής ρεύματος και των χαρακτηριστικών των καναλιών γραμμής ισχύος, δίνοντας έμφαση κυρίως στο κανάλι PLC χαμηλής τάσης (LV).

Επισημαίνεται ότι σχεδόν όλα τα μοντέλα καναλιών που διατίθενται σήμερα εμπίπτουν σε τρεις βασικές κατηγορίες, συγκεκριμένα σε ντετερμινιστικά, εμπειρικά και υβριδικά μοντέλα, και εξετάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών των προσεγγίσεων.

### 2.2 Θεμελιώδεις αρχές μοντελοποίησης καναλιών

Μεταξύ των κύριων τεχνικών προκλήσεων στις επικοινωνίες ηλεκτρικής γραμμής, το κανάλι ηλεκτρικής γραμμής είναι ένα πολύ σκληρό και θορυβώδες μέσο μετάδοσης που είναι πολύ δύσκολο να μοντελοποιηθεί [2] - [7]. Το κανάλι γραμμής ισχύος είναι επιλεκτικό της συχνότητας, μεταβάλλεται χρονικά και επηρεάζεται από τον θόρυβο του έγχρωμου υποβάθρου και τον παλμικό θόρυβο. Επιπλέον, η δομή του δικτύου διαφέρει από χώρα σε χώρα και επίσης το ίδιο ισχύει για τις εσωτερικές καλωδιακές πρακτικές.

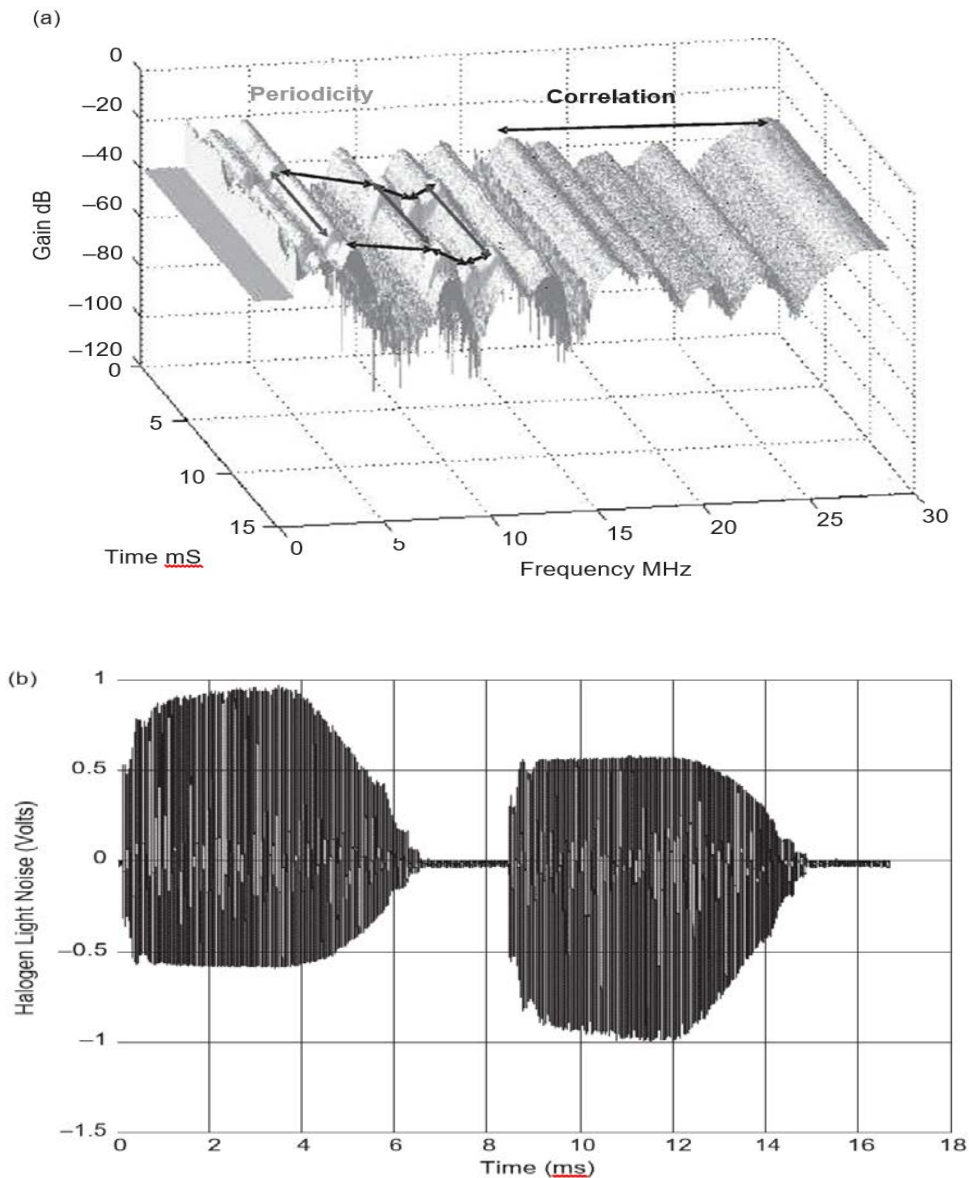
Λόγω της δυσκολίας μοντελοποίησης της λειτουργίας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι πρώτες προσπάθειες μοντελοποίησης βασίστηκαν κυρίως σε φαινομενολογικές μελέτες ή στατιστικές αναλύσεις που προέκυψαν από εκτεταμένες εκστρατείες μέτρησης.

Πιο πρόσφατα, εμφανίζονται έγγραφα που επιχειρούν ντετερμινιστικές προσεγγίσεις, υποδεικνύοντας έτσι ότι μια πιο βασική κατανόηση της φυσικής προωθήσεως σημάτων επικοινωνίας μέσω γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας αναδύεται τώρα. Είναι αξιοσημείωτο ότι τα αποτελέσματα αυτών των πρόσφατων αιτιοκρατικών προσεγγίσεων επιβεβαιώνουν πραγματικά την εγκυρότητα ορισμένων από τις υποθέσεις που διατυπώθηκαν κατά το χρόνο που οι αναλυτικές προσεγγίσεις δεν κρίθηκαν εφικτές, π.χ. η πολλαπλών διαδρομών φύση της μετάδοσης σήματος κατά μήκος των καλωδίων ηλεκτρικής γραμμής.

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του καναλιού ηλεκτρικής γραμμής είναι η χρονική διακύμανση της συμπεριφοράς του. Η λειτουργία μεταφοράς καναλιού του καναλιού γραμμής ρεύματος μπορεί να διαφέρει απότομα όταν αλλάζει η τοπολογία, δηλαδή όταν οι συσκευές συνδέονται ή αποσυνδέονται και ενεργοποιούνται ή απενεργοποιούνται. Ωστόσο, η λειτουργία μεταφοράς γραμμής ρεύματος παρουσιάζει μια χρονικά μεταβαλλόμενη συμπεριφορά ακόμα και αν η τοπολογία του δικτύου και το φορτίο (συσκευές) που συνδέονται με αυτό δεν υποστούν απότομες αλλαγές.

Συγκεκριμένα, ο διάυλος γραμμής ισχύος παρουσιάζει βραχυπρόθεσμη μεταβολή, επειδή οι παράμετροι υψηλής συχνότητας των ηλεκτρικών συσκευών εξαρτώνται από το στιγμιαίο εύρος της τάσης δικτύου, το οποίο μπορεί να μεταφράζεται σε περιοδικές μεταβολές των εμπεδήσεων φορτίου. Επιπλέον, ο θόρυβος που εισάγεται στο κανάλι από συσκευές εξαρτάται επίσης από το στιγμιαίο εύρος της τάσης δικτύου. Επομένως, μια κυλοσταθερή συμπεριφορά στην επιλεκτικότητα χρόνου του καναλιού καθώς και στον θόρυβο προκύπτει και η περίοδος είναι συνήθως η μισή περίοδος κύριας.

Ένα παράδειγμα αυτής της συμπεριφοράς που είναι μοναδικό στο κανάλι της γραμμής ρεύματος φαίνεται στο σχήμα 2.1, όπου απεικονίζεται η μετρηθείσα χρονική διακύμανση μιας συνάρτησης μεταφοράς καναλιού εσωτερικής γραμμής ισχύος και η κυματομορφή θορύβου που παράγεται από ένα φως αλογόνου με φλας.



Σχήμα 2.1 (α) Μετρούμενη χρονική διακύμανση ενός εσωτερικού καναλιού ηλεκτρικής γραμμής. Η επιλεκτικότητα χρόνου εμφανίζεται με ρυθμό περιόδου, ενώ η εκλεκτικότητα συχνότητας εμφανίζει συσχέτιση σε διάφορες χρονικές στιγμές. (β) Κυματομορφή θορύβου που δημιουργείται από ένα φως αλογόνου με ρυθμιστή έντασης κατά τη διάρκεια ενός κυκλώματος δικτύου 60 Hz.

Παρά τη σπουδαιότητα και τη μοναδικότητα αυτής της συμπεριφοράς, υπάρχουν λίγες συνεισφορές που αντιμετωπίζουν αυτό το χαρακτηριστικό (βλέπε [8] - [13] και τις αναφορές σε αυτό) και μια συμβολή που αντιμετωπίζει ειδικά το ζήτημα της χαρτογράφησης απευθείας στο διακριτό πεδίο χρόνου του διαμορφωμένου σήματος εισόδου στην έξοδο όταν λαμβάνεται υπόψη η χρονική μεταβλητότητα του καναλιού [14]. Στο [9], η ντετερμινιστική και τυχαία σχέση εισόδου-εξόδου για ένα σύστημα γραμμικής μεταβολής χρόνου Linear Time Variant (LTV) βρίσκεται για τα κανάλια γραμμής ισχύος τόσο στον τομέα χρόνου όσο και συχνότητας.

Στο [14], ο χειριστής συνέλιξης εκφράζεται σε μορφή μήτρας και εξετάζονται και οι δύο περιπτώσεις Linear Time Invariant (LTI) και LTV. Στην περίπτωση LTI το κανάλι είναι

που μοντελοποιείται από συνηθισμένες μήτρες Toeplitz, ενώ στην περίπτωση LTV το κανάλι μοντελοποιείται με ειδικές ζώνες μήτρας. Η σημαντική πτυχή που πρέπει να επισημανθεί είναι ότι τα παραδοσιακά μοντέλα καναλιών που βασίζονται σε πολλαπλή διανομή μονοπατιών αποτυγχάνουν να καταγράψουν την επιλεκτικότητα του χρόνου.

Αρκετές ομάδες ακολουθούν μεθόδους για να συναγάγουν σχετική στατιστική συμπεριφορά από σύνολα φυσικών μοντέλων και μετρήσεων, π.χ. βλέπε [15] - [19] και αναφορές σε αυτό. Άλλες ομάδες ακολουθούν μια ντετερμινιστική προσέγγιση που βασίζεται σε ακριβή πρότυπα καναλιών, π.χ. βλέπε [20] - [28], και αναφορές σε αυτό. Τα προσδιοριστικά μοντέλα απαιτούν λεπτομερή γνώση της τοπολογίας συνδέσμων και των μοντέλων καλωδίων, αλλά δεν απαιτούν μετρήσεις. Τα στατιστικά μοντέλα μπορούν να ληφθούν είτε με την τοποθέτηση των αποτελεσμάτων των εκστρατειών μέτρησης, π.χ. βλέπε [29], [30] ή με στατιστική περιγραφή της τοπολογίας του δικτύου, π.χ. βλέπε [25], [31], [32].

Τα πρόσφατα αποτελέσματα φαίνεται να υποδεικνύουν ότι, εάν έχει διαμορφωθεί σωστά, η συνάρτηση μεταφοράς καναλιού ηλεκτρικής γραμμής παρουσιάζει περισσότερη αιτιολογία απ'ό,τι συνήθως πιστεύεται.

Αυτός ο ντετερμινισμός θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για τον ισχυρό σχεδιασμό του μόντεμ και τη βελτιστοποίηση του συστήματος. Παραδείγματος χάριν, η συμμετρία του καναλιού γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας (μαθηματικά αποδεδειγμένη και πειραματικά επικυρωμένη στα [33] και [27]) ανοίγει την πόρτα σε πληροφορίες-θεωρητικές σκέψεις σχετικά με τη βέλτιστη μετάδοση όταν το κανάλι είναι γνωστό στον πομπό.

Για παράδειγμα, η αντιμετώπιση γνωστής παρεμβολής μεταξύ παρεμβολών, όπως είναι γνωστή η παρεμβολή στον πομπό, μας επιτρέπει να χρησιμοποιούμε αποτελεσματικότερα προγράμματα προκαθορισμού όπως το Tomlinson-Harashima ή γενικότερα, την κωδικοποίηση βρώμικου χαρτιού (dirty paper coding). Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε στο [27], είναι δυνατό να απομονωθούν οι αντανακλάσεις και οι τρόποι συντονισμού με βάση συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της τοπολογίας της γραμμής ισχύος. Αυτή η ιδιότητα της υπέρθεσης τρόπων συντονισμού μας επιτρέπει να εκτιμούμε πιο αποτελεσματικά τις ομοιότητες μεταξύ των λειτουργιών μεταφοράς γραμμής ισχύος που ανήκουν στο ίδιο σπίτι και αυτή η γνώση μπορεί να ενσωματωθεί στον προσαρμοστικό ισοσταθμιστή ενός μόντεμ γραμμής ισχύος.

Είναι επίσης σημαντικό να επισημάνουμε ότι οι υβριδικές προσεγγίσεις που περιγράφονται στα [25], [28] και [11] μπορούν να ενσωματώσουν αυτή την εγγενή συσχέτιση. Είναι σημαντικό να μπορούμε να μοντελοποιήσουμε τη χωρική συσχέτιση των αποκρίσεων καναλιού όταν, για παράδειγμα, πρέπει να αναλυθούν πρωτόκολλα επικοινωνίας πολλαπλών χρηστών ή συνεργατικών επικοινωνιών.

Για παράδειγμα, στο πλαίσιο της επικοινωνίας με τους ηλεκτρονόμους, χρησιμοποιήθηκε ένα στατιστικό μοντέλο καναλιού εκ των κάτω προς τα πάνω [34], ενώ για την αξιολόγηση της ασφάλειας φυσικού στρώματος αναπτύχθηκε ένα μοντέλο στατιστικών καναλιών από την κορυφή προς τα κάτω [35]

### 2.3 Τοπολογίες χαμηλής, μέσης και υψηλής τάσης

Οι γραμμές υψηλής τάσης (HV) φέρουν τάσεις στην περιοχή (110 - 380 kV) και καλύπτουν πολύ μεγάλες γεωγραφικές αποστάσεις. Αυτές οι γραμμές έχουν χρησιμοποιηθεί ως μέσο επικοινωνίας για τη φωνή από τη δεκαετία του 1920 [36] μέσω διαμόρφωσης πλάτους μονής πλευρικής ζώνης (συστήματα μεταφορέων ισχύος). Σήμερα, οι επικοινωνίες μέσω γραμμών υψηλής τάσης περιλαμβάνουν τόσο αναλογικά συστήματα (τηλε-προστασία) όσο και ψηφιακά συστήματα (μετάδοση φωνής και δεδομένων).

Συνήθως χρησιμοποιούνται γραμμές διανομής ισχύος χαμηλής τάσης (100 - 400 V) για επικοινωνία υψηλής ταχύτητας PLC. Τα συστήματα ισχύος μέσης τάσης αναπτύσσονται τυπικά σε διαμόρφωση βρόχου, αλλά μερικές φορές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συστήματα ανοιχτού βρόχου και συστήματα δέντρων με ακτινικά διατεταγμένες γραμμές. Επιπλέον, οι γραμμές διανομής αποτελούνται από υπόγεια ή εναέρια καλώδια.

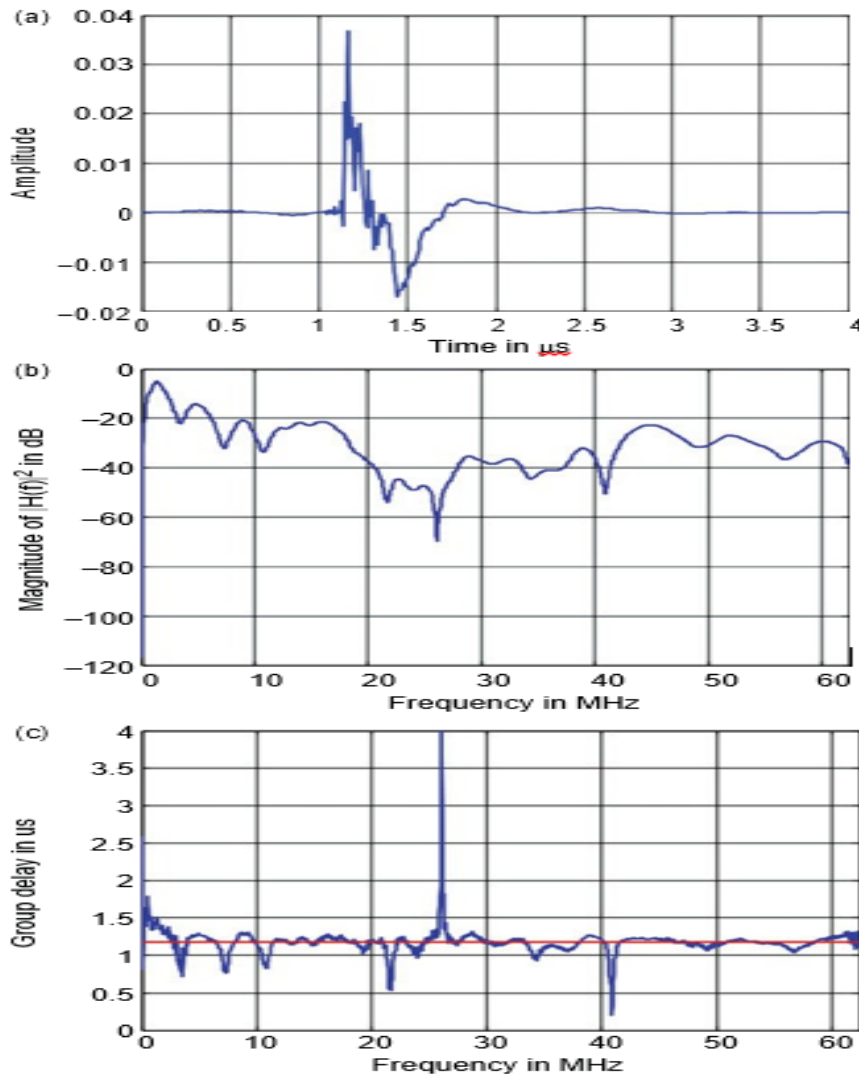
Σε μία μονοφασική διαμόρφωση, τροφοδοτείται ένας αγωγός φάσης και ένας επιστροφής (ουδέτερος) αγωγός στον κύριο πίνακα εγκαταστάσεων. Μερικές φορές προστίθεται επίσης χωριστός αγωγός γείωσης. Αυτή η διαμόρφωση είναι χαρακτηριστική για μικρά κτίρια κατοικιών. Γενικά, η εταιρεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διανέμει τρεις φάσεις, και μόνο μία από αυτές τροφοδοτείται σε ένα σπίτι, ενώ ένας γείτονας μπορεί να εξυπηρετηθεί από μια άλλη φάση. Στις Η.Π.Α., οι τιμές τάσης είναι 60 Hz 120 V, επιτρέποντας μια περιοχή (114 - 126 V) (ANSI C84.1). Η νέα εναρμονισμένη ονομαστική τάση στην Ευρώπη είναι 230 V (εύρος, 207 - 253 V) 50 Hz (παλαιότερα, 240 V στο Ηνωμένο Βασίλειο, 220 V στην υπόλοιπη Ευρώπη).

Τρεις φάσεις (τρεις αγωγοί συν μία επιστροφή) είναι συνηθισμένες στην Ευρώπη, αλλά όχι στις ΗΠΑ. Το σύστημα τριών αγωγών που βλέπει ο χρήστης συνήθως προέρχεται από τριφασική κατανομή, η οποία χρησιμοποιεί ένα τετρασύνολο ή πέντε αγωγών σύστημα. Στο σύστημα των πέντε αγωγών υπάρχουν τρεις φάσεις, ένας ουδέτερος και μία γείωση. Η κοινή υποδοχή τριών αγωγών χρησιμοποιεί μόνο μία από τις τρεις φάσεις. Στην Ευρώπη οι περισσότεροι χρησιμοποιούν 230/400 V, όπου τα 230 V μπορούν να βρεθούν ανάμεσα σε οποιαδήποτε από τις τρεις φάσεις και ουδέτερο και τα 400 V μπορούν να βρεθούν ανάμεσα σε δύο από τις τρεις φάσεις. Η διαφορά φάσης μεταξύ των φάσεων είναι 120 μοίρες.

## 2.4 Χαρακτηριστικά του καναλιού εσωτερικού χώρου στις ζώνες HF και VHF

Μια τυπική παλμική απόκριση καναλιού γραμμής ηλεκτρικής τάσης, λειτουργία μετάδοσης συχνότητας και γραφική παράσταση καθυστέρησης ομάδας απεικονίζονται στο σχήμα 2.2. Είναι ενδιαφέρον να επιβεβαιώσουμε ότι η μέση καθυστέρηση ομάδας είναι κοντά στην καθυστέρηση διάδοσης, η μετάδοση καθυστέρησης είναι πολύ μικρότερη από τη διάρκεια της παλμικής απόκρισης, η καθυστέρηση της ομάδας έχει κορυφές σε εκείνες τις συχνότητες όπου το εύρος της συνάρτησης μεταφοράς εξαφανίζεται.

Γενικά, τα κανάλια εσωτερικής γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας στη ζώνη HF (2-30 MHz) εμφανίζουν τη συμπεριφορά που φαίνεται στο σχήμα 2.2. Η λειτουργία μεταφοράς συχνότητας εμφανίζει επιλεκτικότητα υψηλής συχνότητας. Επιπλέον, η καθυστέρηση ομάδας επίσης δείχνει υψηλή μεταβλητότητα με πολλαπλές κορυφές. Αυτό σημαίνει ότι το κανάλι γραμμής ισχύος παρουσιάζει τόσο παραμόρφωση πλάτους όσο και καθυστέρηση.



Σχήμα 2.2 Τυπικό κανάλι εσωτερικής γραμμής ισχύος μετρούμενο: (α) απόκριση παλμού. β) λειτουργία μεταφοράς συχνότητας · (γ) ομαδική καθυστέρηση έναντι συχνότητας (η μέση καθυστέρηση ομάδας παρουσιάζεται ως έντονη γραφή).

Αυτό μπορεί να εξηγηθεί λαμβανομένου υπόψη ότι οι παράλληλες συνδέσεις - οι οποίες μαζί με την πρόσφυση γείωσης αντιπροσωπεύουν τις περισσότερες πολλαπλών διαδρομών - έχουν μήκη συγκρίσιμα με το μήκος κύματος  $\lambda$  των σημάτων HF ( $10 \text{ m} \leq \lambda \leq 150 \text{ m}$ ). Μια παράλληλη σύνδεση με μήκος ίσο με το ένα τέταρτο του  $\lambda$  προκαλεί  $\rho$ - μετατοπισμένη ανάκλαση για να προστεθεί συνεκτικά με το κύριο σήμα παράγοντας έτσι μία εγκοπή στη συχνότητα που αντιστοιχεί στο μήκος κύματος  $\lambda$ .

Εάν το γεφυρωμένο μήκος της παράλληλης σύνδεσης είναι ένα μικρό πολλαπλάσιο του τετάρτου μήκους κύματος, τότε η ανάκλαση  $\rho$  θα μετατοπιστεί ελαφρώς μόνο σε σχέση με το κύριο σήμα και αυτό θα προκαλέσει εμβάπτιση στη λειτουργία μεταφοράς συχνότητας. Δεδομένου ότι οι παράλληλες συνδέσεις με μήκος ίσο με ένα μικρό πολλαπλάσιο του τετάρτου μήκους κύματος των συχνοτήτων στη ζώνη HF είναι πολύ συνηθισμένες για εσωτερικές τοπολογίες, το κανάλι εσωτερικής γραμμής ισχύος στην περιοχή HF χαρακτηρίζεται από πολλές εγκοπές συχνοτήτων και βυθίσεις και, συνεπώς, από πολλές κορυφές καθυστέρησης ομάδας όπως προβλέπεται από το (2.2).

### 2.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των προσεγγίσεων μοντελοποίησης

Ειδικά για την εσωτερική περίπτωση, υπάρχει ένα υψηλό υπολογιστικό κόστος για την εκτίμηση της καθυστέρησης, του εύρους και της φάσης που συνδέονται με κάθε ένα από τα πολλά μονοπάτια (είναι ένα μοντέλο χρόνου-χρόνου, επομένως όλες οι πιθανές αντανakλάσεις  $N$  από τους ασύγκριτους τερματισμούς κατά μήκος γραμμής πρέπει να λογιστικοποιούνται ξεχωριστά).

Στην πραγματικότητα, όπως φαίνεται παραπάνω, προσθέτοντας μία απλή ασυνέχεια, ο αριθμός και ο τύπος των δευτερευόντων διαδρομών αυξάνεται δραστικά.

Η πολυπλοκότητα της εξατομικευμένης λογιστικής για όλα αυτά μπορεί σύντομα να ξεπεραστεί για τυπικές εσωτερικές τοπολογίες που μπορούν να βρεθούν στο πεδίο και που χαρακτηρίζονται από πολλά επίπεδα διακλάδωσης. Επιπλέον, η τιμή του  $N$  στο (2.1) είναι άγνωστη επειδή δεν είναι δυνατόν να γνωρίζουμε εκ των προτέρων πόσες δευτερεύουσες διαδρομές δεν είναι αμελητέες σε σχέση με την άμεση διαδρομή.

Κατά συνέπεια, υπάρχει το πρόσθετο πρόβλημα της εκτίμησης της παραγγελίας μοντέλου  $N$ . Αυτό είναι ένα μείζον μειονέκτημα για τη μοντελοποίηση εσωτερικών ζεύξεων, όπου οι συνολικές μικρές αποστάσεις καθιστούν απαραίτητη την ενσωμάτωση πολλών περισσότερων διαδρομών σήματος επειδή υπάρχουν πολλοί κλάδοι που δεν έχουν τερματιστεί και, επιπλέον, οι ανακλάσεις ηχούς εμφανίζουν πολύ μικρότερη εξασθένιση από ότι στην εξωτερική περίπτωση, δεδομένου του μικρότερου μήκους εσωτερικών συρμάτων. Το τελευταίο

αυτό πρόβλημα έχει συχνά υποτιμηθεί, αλλά αποτελεί μειονέκτημα για οποιοδήποτε μοντέλο τομέα χρόνου.

Το κύριο πλεονέκτημα ενός μοντέλου τομέα συχνοτήτων είναι ότι η υπολογιστική του πολυπλοκότητα είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την πολυπλοκότητα της τοπολογίας. Στην πραγματικότητα, ένα μοντέλο τομέα συχνοτήτων περιέχει το σύνθετο όλων των σημάτων που αντανακλώνται από τις ασυνέχειες (πολλαπλών διαδρομών) πάνω από τη μετρούμενη περιοχή συχνοτήτων, ενώ σε ένα μοντέλο χρονικού πεδίου θα ήταν απαραίτητο να δημιουργηθούν όλες οι διαφορετικές διαδρομές μεμονωμένα.

Από την άλλη πλευρά, το κύριο μειονέκτημα μιας προσέγγισης περιοχών συχνοτήτων που βασίζεται στη θεωρία TL είναι ότι όλα σχετικά με τη σύνδεση πρέπει να είναι γνωστά a priori: η τοπολογία, οι τύποι καλωδίων και τα χαρακτηριστικά τους και οι τερματικές αντιστάσεις σε κάθε κλάδο: ατελής γνώση σχετικά με αυτές τις ποσότητες μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια του μοντέλου καναλιού εάν αποτελούν μέρος της κυρίαρχης διαδρομής σε μια δεδομένη συχνότητα. Επειδή είναι συχνά αδύνατο να έχουμε μια τέτοια λεπτομερή γνώση του δικτύου, αυτή η γνώση μπορεί να θεωρηθεί ως η τιμή που πρέπει να πληρώσουμε για να αποφύγουμε προκαταρκτικές μετρήσεις, όπως απαιτεί το μοντέλο πολλαπλών διαδρομών. Ωστόσο, αυτή η αιτιοκρατική μεθοδολογία θα μπορούσε να υιοθετηθεί για τον χαρακτηρισμό της περίπτωσης ορισμένων οχημάτων, δεδομένου ότι η καλωδίωση και οι πρακτικές είναι καλά τεκμηριωμένες κατά τη διάρκεια της φάσης σχεδιασμού, έτσι ώστε όλες οι πληροφορίες που απαιτούνται από τη μοντελοποίηση TL να είναι εύκολα διαθέσιμες.

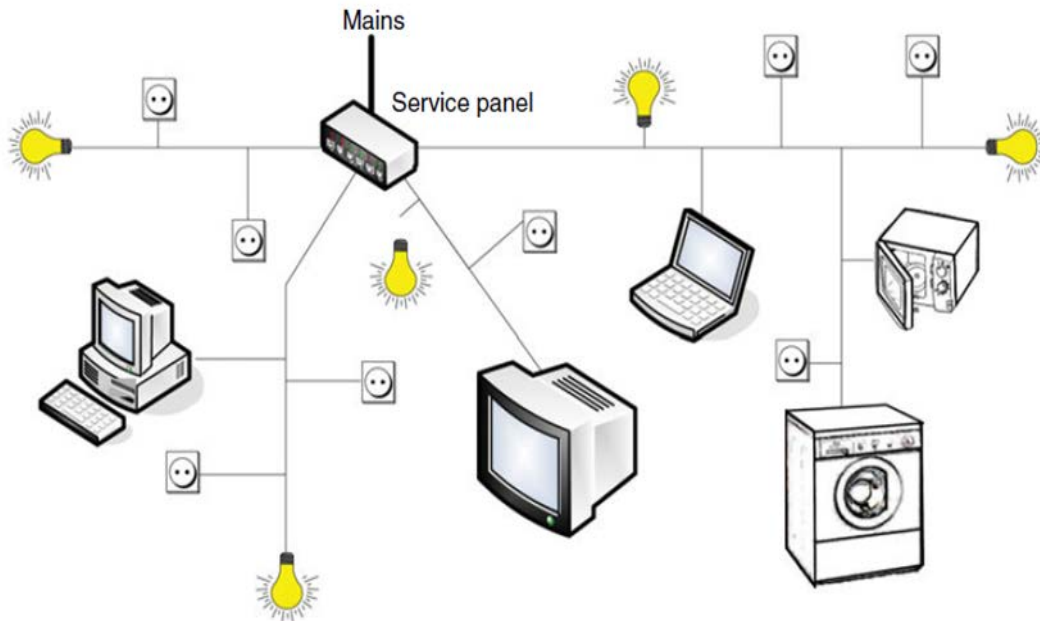
Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι συνθήκες επιτρέπουν την καλή ακρίβεια στο μοντέλο καναλιού [62], αλλά σε άλλες περιπτώσεις, η έλλειψη ενός επιπέδου γείωσης ή η έλλειψη σταθερής γεωμετρίας (κίνηση σύρματος εντός του οχήματος) μπορεί να κάνει το μοντελοποίηση καναλιών πολύ δύσκολη ακόμη και αν η τοπολογία είναι γνωστή [63].

## 2.6 Αρχές μοντελοποίησης

Η μοντελοποίηση καναλιού εσωτερικού χώρου αντιπροσωπεύει πιθανώς μία από τις πιο ενδιαφέρουσες προκλήσεις στα συστήματα PLC, από τεχνική άποψη. Υπάρχουν δύο λόγοι για αυτό. Αρχικά, η τοπολογία είναι λιγότερο ομοιογενής σε αυτό το τμήμα του δικτύου, είναι πιο διακλαδισμένη, καθιστώντας τη συμπεριφορά του καναλιού πιο απρόβλεπτη, ειδικά στη ζώνη μέσης και υψηλής συχνότητας. Η παραδοσιακή ζώνη που χρησιμοποιείται για εσωτερικά συστήματα PLC εκτείνεται μέχρι 30 MHz, η οποία αποτελεί ένα διάχυτο όριο από το οποίο η ακτινοβολία ενέργειας αρχίζει να κυριαρχεί πάνω από την αγωγιμότητα. Η καλωδίωση στις περισσότερες χώρες είναι ένα δέντρο που μοιάζει με δίκτυο που αναπτύσσεται από τον πίνακα



εξυπηρέτησης μέσω διαφόρων κυκλωμάτων διακλάδωσης που φθάνουν στις εξόδους με μη καθορισμένο τρόπο, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3. Η ακριβής διάταξη των κυκλωμάτων, ο αριθμός των τμημάτων σύρματος σε κάθε κύκλωμα κλάδου και τα μήκη τους είναι συχνά άγνωστα. Δεύτερον, υπάρχουν συσκευές με αρκετά διαφορετικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την απόκριση του καναλιού και εισάγουν διαταραχές.



Σχήμα 2.3 Σχήμα εσωτερικού δικτύου PLC

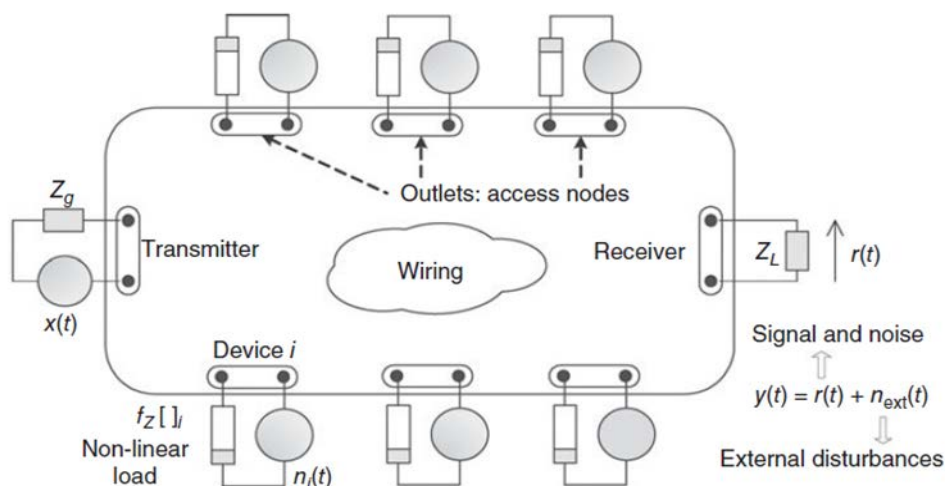
Όπως αναλύεται στην Ενότητα 2.2, υπάρχουν διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις για την αντιμετώπιση της μοντελοποίησης των καναλιών PLC. Στη βιβλιογραφία έχει καταβληθεί κάποια προσπάθεια να ληφθούν ντετερμινιστικά μοντέλα για εσωτερικούς διαύλους από την προσέγγιση από τη βάση προς την κορυφή [28]. Ωστόσο, με στόχο την αξιολόγηση της εγκυρότητας της στρατηγικής μοντελοποίησης, δοκιμάζοντας μια συγκεκριμένη και γνωστή τοπολογία δικτύου, αντί να χρησιμεύσει ως γενικός χαρακτηρισμός κανάλι. Αυτός ο τελευταίος σκοπός θα μπορούσε να εκπληρωθεί σε άλλα πιο προβλέψιμα μέρη του ηλεκτρικού δικτύου, όπως το υπαίθριο δίκτυο χαμηλής τάσης [52]. Αντίθετα, φαίνεται πιο ενδεδειγμένο να θεωρηθούν οι φυσικές παράμετροι των δικτύων εσωτερικών γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας ως ένα σύνολο τυχαίων μεταβλητών, των οποίων οι στατιστικές παράμετροι είναι ασαφείς και δύσκολο να εκτιμηθούν.

Άλλα προτεινόμενα μοντέλα υιοθετούν μια στρατηγική από την κορυφή προς τα κάτω, καθορίζοντας ένα μοντέλο για τη συμπεριφορά των καναλιών απευθείας από τις καμπάνιες μέτρησης [15], [17], [30], [43], [56], [74] - [76]. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα μοντέλα οδηγούν σε χαρακτηρισμό απόκρισης παλμών μέσω ενός ορισμένου αριθμού διακριτών ηχώ. Αυτές οφείλονται στο φαινόμενο πολλαπλών διαδρομών που εμφανίζεται καθώς το σήμα μεταδίδεται

μέσω του εσωτερικού δικτύου ηλεκτρικής γραμμής, αντιμετωπίζοντας μια ασυμμετρία σύνθετης αντίστασης σε κάθε ασυνέχεια (διασταυρώσεις μεταξύ διαφορετικών τμημάτων φορτίων καλωδίων και τερματικών). Ο αριθμός των σημαντικών ηχώ που απαιτούνται για την επίτευξη ενός καλού μοντέλου με αυτή τη στρατηγική μπορεί να είναι πολύ μεγάλος.

Η προσέγγιση που περιγράφεται σε αυτή την ενότητα είναι διαφορετική. Βασίζεται σε μια μοντελοποίηση από τη βάση προς την κορυφή, αλλά όχι απαραίτητα ντετερμινιστική, καθορίζοντας τις παραμέτρους του καναλιού από τα χαρακτηριστικά του φυσικού δικτύου και εξάγοντας αργότερα ένα μοντέλο συμπεριφοράς όπως προηγουμένως εισήχθη σε [11], [25] και αργότερα χρησιμοποιήθηκε και σε [31]. Επιλέγοντας τις τιμές φυσικών παραμέτρων με έξυπνο τρόπο, μπορούν να ληφθούν αντιπροσωπευτικά κανάλια ή τυχαία κανάλια [32], [77].

Προκειμένου να ληφθεί ένα δομικό μοντέλο του εσωτερικού καναλιού, πρέπει να εντοπιστούν τα στοιχεία του δικτύου: τα υποσυστήματα του πομπού και του δέκτη, η καλωδίωση, οι συσκευές που είναι συνδεδεμένες με αυτές και οι εξωτερικές διαταραχές. Ένα διάγραμμα του δομικού μοντέλου παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4. Στα συστήματα PLC, ο πομπός συνδέεται συνήθως στον δέκτη χρησιμοποιώντας δύο αγωγούς, το ουδέτερο και τη γραμμή.



Σχήμα 2.4 Δομικό μοντέλο για δίκτυο εσωτερικών γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας.

Η σύνδεση δημιουργείται μέσω κυκλωμάτων ζεύξης που προστατεύουν τα υποσυστήματα από την τάση δικτύου και φιλτράρουν τα σήματα στην επιθυμητή ζώνη. Προσπαθούν επίσης να προσαρμόσουν την σύνθετη αντίσταση στο δίκτυο του υποσυστήματος του ηλεκτρικού δικτύου, αν και είναι πολύ δύσκολο έργο, επειδή η αντίσταση εισόδου που μετράται σε οποιαδήποτε έξοδο είναι πολύ επιλεκτική και απρόβλεπτη. Οι τιμές κυμαίνονται από λίγα έως χίλια  $\omega\text{m}$ . Το φαινόμενο των κυκλωμάτων ζεύξης μπορεί να συμπεριληφθεί στο μοντέλο με δύο ισοδύναμους τρόπους: θεωρώντας τους ως μέρος του καναλιού ή συμπεριλαμβάνοντας τους στο υποσύστημα πομπού και δέκτη.

Η καλωδίωση μπορεί να διαμορφωθεί ως σύνδεση πολλαπλών τμημάτων γραμμών μεταφοράς. Πρόκειται για μια απλούστευση επειδή οι αγωγοί δεν παρουσιάζουν ένα κανονικό σχέδιο στο εγκάρσιο επίπεδο προς την κατεύθυνση διάδοσης (οι αγωγοί μπορούν να χαλαρώσουν μέσα σε ένα σωλήνα, να αναμειχθούν σε γωνίες, να στρεβλωθούν ακανόνιστα κλπ.). Ο πομπός και ο δέκτης (συμπεριλαμβανομένων των φίλτρων ζεύξης) μπορούν να μοντελοποιηθούν με τα ισοδύναμα κυκλώματα τους Thevenin, που χαρακτηρίζονται από μια επιλεκτική σύνθετη αντίσταση συχνότητας. Οι συσκευές είναι οι διαφορετικές συσκευές στο σπίτι ή στο μικρό γραφείο. Κάθε μία από αυτές μπορεί να θεωρηθεί ως φορτίο με μια συγκεκριμένη σύνθετη αντίσταση (επιλεκτικής συχνότητας και χρονικής μεταβολής) και, τελικά, μια πηγή θορύβου. Η πρόσβαση στο δίκτυο γενικών γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας πίσω από τον πίνακα εξυπηρέτησης μπορεί να διαμορφωθεί ως μια πρόσθετη συσκευή με φορτίο που συνήθως έχει πολύ χαμηλή αντίσταση. Τέλος, οι εξωτερικές διαταραχές αντιπροσωπεύουν οποιοδήποτε είδος ανεπιθύμητου σήματος που δεν προκαλείται από τις συσκευές του εσωτερικού δικτύου, μεταξύ των οποίων υπάρχει ο θόρυβος που περνάει από το πάνελ υπηρεσίας και τα ραδιοκύματα, από τις υπηρεσίες εκπομπής και άλλες.

Ο χαρακτηρισμός των στοιχείων γραμμής ισχύος καθορίζει το τελικό μοντέλο συμπεριφοράς. Είναι λογικό να θεωρήσουμε τη συμπεριφορά καλωδίωσης ως γραμμική και χρονικά αμετάβλητη (LTI), αλλά αυτή η υπόθεση δεν είναι τόσο σαφής για τις συσκευές. Από τη μία πλευρά, η κατάσταση λειτουργίας των συσκευών αλλάζει κατά μήκος του χρόνου, καθώς ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται. Παρ' όλα αυτά, αυτό το είδος μεταβάσεων συμβαίνει με ρυθμό πολύ χαμηλότερο από τον τυπικό ρυθμό δυαδικών ψηφίων των συστημάτων PLC και έχουν μόνο αντίκτυπο στη μακροπρόθεσμη μεταβολή του καναλιού. Από την άλλη πλευρά, τα φορτία πολλών συσκευών έχουν μη γραμμικό χαρακτήρα (για παράδειγμα, λόγω ανορθωτών και άλλων παρόμοιων συνιστωσών) που, υπό την παρουσία της τάσης δικτύου, οδηγούν σε μια οιονεί γραμμική αλλά χρονικά μεταβαλλόμενη συμπεριφορά. Αυτή η συμπεριφορά είναι υπεύθυνη για μια παραλλαγή βραχυπρόθεσμου καναλιού.

Από το προηγούμενο επιχείρημα, πρέπει να ληφθούν υπόψη διαφορετικές χρονικές κλίμακες προκειμένου να περιγραφεί η διακύμανση του χρόνου του καναλιού.

Προτείνεται η ακόλουθη ταξινόμηση:

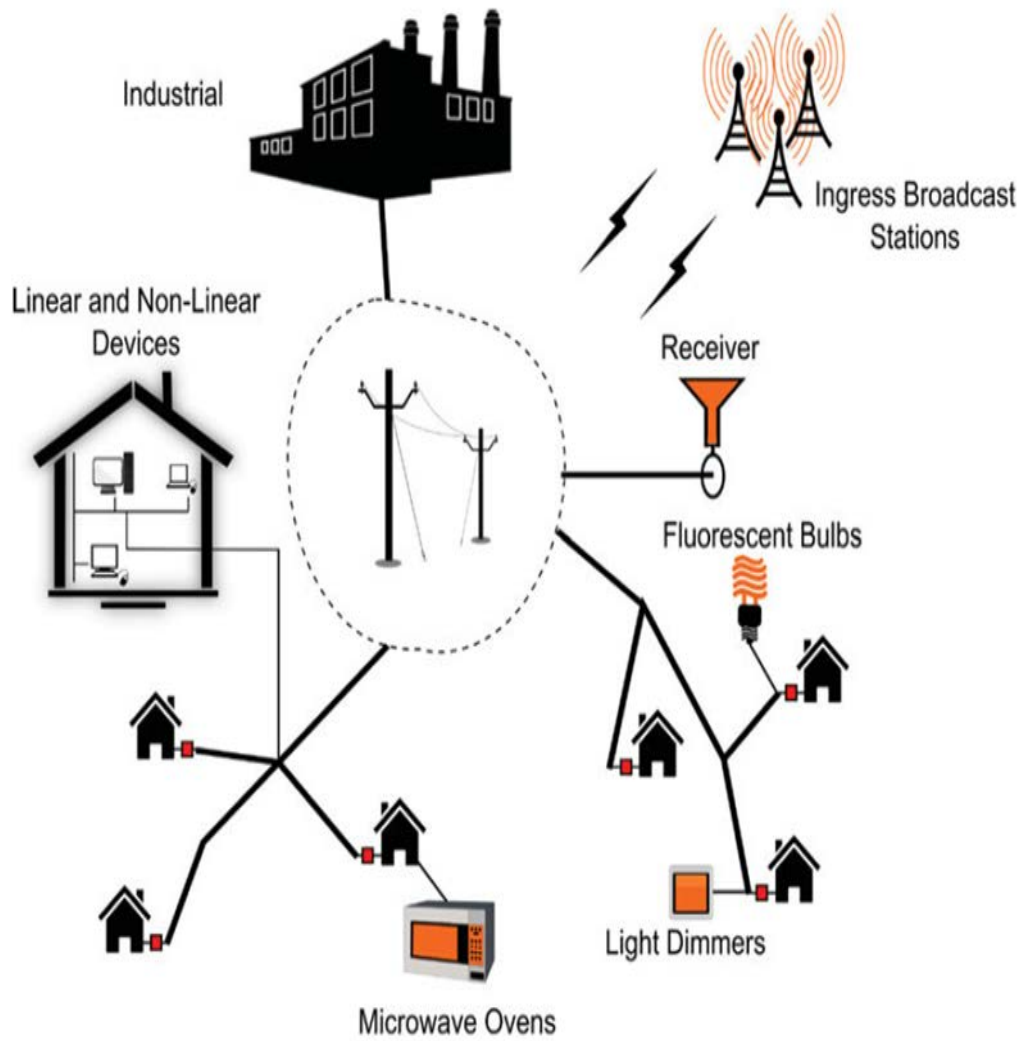
**Αμετάβλητη κλίμακα:** Σε αυτό το επίπεδο, οι συνθήκες του καναλιού μπορούν να θεωρηθούν αμετάβλητες, οπότε ένα σύστημα LTI θα είναι ένα κατάλληλο μοντέλο. Τα χρονικά διαστήματα αυτής της κλίμακας, διαστήματα αναμείξεως, πρέπει να επιλέγονται σύμφωνα με τον χρόνο συνοχής του καναλιού, τυπικά της τάξης των εκατοντάδων μικροδευτερολέπτων.

**Κυκλική κλίμακα:** Σε αυτή την κλίμακα, το κανάλι παρουσιάζει περιοδικές μεταβολές συγχρονισμένες με τον κύκλο της τάσης και η κατάλληλη προσέγγιση είναι να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα LPTV για να το μοντελοποιήσει. Η φυσική μονάδα χρόνου είναι η χρονική περίοδος, δηλαδή 20 ms (50 Hz) ή 16,67 ms (60 Hz). Ωστόσο, η κύρια περίοδος μπορεί να χωριστεί σε μια σειρά βραχύτερων διαστημάτων ανανέωσης, στα οποία λαμβάνεται ένα στιγμιότυπο της απόκρισης καναλιού. Στη συνέχεια, ο διάυλος μπορεί να αντιπροσωπεύεται από μια περιοδική σειρά τέτοιων αμετάβλητων αποκρίσεων που είναι στιγμιαία δείγματα της χρονικά μεταβαλλόμενης απόκρισης.

**Τυχαία κλίμακα:** Σε αυτήν την κλίμακα ισχύει η μακροπρόθεσμη διακύμανση του καναλιού. Αυτό καθορίζεται από την κατάσταση λειτουργίας των συσκευών. Δεδομένου ότι αλλάζουν τυχαία εγκαίρως, δεν έχουν τακτική διακριτοποίηση εγκαίρως. Ωστόσο, η απόκλιση του χρόνου μεταξύ των αλλαγών είναι πολλές τάξεις μεγέθους πάνω από την κυκλική κλίμακα, καθώς συνδέονται με την ανθρώπινη δραστηριότητα στα σπίτια. Κάθε φορά που πραγματοποιείται μετάβαση στην κατάσταση λειτουργίας οποιασδήποτε συσκευής, επιτυγχάνεται μια νέα πραγματοποίηση των φυσικών παραμέτρων του δικτύου ηλεκτρικής γραμμής και μπορεί να ληφθεί υπόψη ένα νέο σύστημα LPTV (δηλαδή μπορεί να θεωρηθεί ότι οι διάυλοι παραμένουν στις κυκλικές τους συνθήκες μεταξύ μεταβάσεων).

## 2.7 Θόρυβος και παρεμβολή

Τα δίκτυα επικοινωνίας γραμμής ισχύος, αρχικά σχεδιασμένα για μεταφορά ισχύος, παρουσιάζουν ένα εχθρικό περιβάλλον για συστήματα επικοινωνίας. Ο θόρυβος της γραμμής ρεύματος, που προκύπτει από διάφορες συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5, είναι ένας σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει σε αυτό το εχθρικό περιβάλλον. Αυτός ο θόρυβος αποκλίνει σημαντικά από τον υποθετικό πρόσθετο λευκό Gaussian (AWGN) που χρησιμοποιείται συνήθως για το σχεδιασμό και την ανάλυση των συστημάτων επικοινωνίας και χαρακτηρίζεται από την παρουσία ισχυρού, χρονικά μεταβαλλόμενου μη λευκού και συχνά μη Gaussian θορύβου.



Σχήμα 2.5 Διάφορες πηγές θορύβου στα δίκτυα επικοινωνίας γραμμής ισχύος που παρεμβαίνουν στο σήμα επικοινωνίας σε ένα συγκεκριμένο δέκτη. [157] © 2012 IEEE.

## 2.8 Αναφορές

1. J. D. Parsons, *Mobile Radio Propagation Channel*, 2nd ed. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2000.
2. S. Galli, A. Scaglione, and K. Dostert, Broadband is power: Internet access through the power line network, *IEEE Commun. Mag.*, 41(5), 82–83, May 2003.
3. H. A. Latchman and L. W. Yonge, Power line local area networking, *IEEE Commun. Mag.*, 41(4), 32–33, Apr. 2003.
4. E. Biglieri, S. Galli, Y.-W. Lee, H. V. Poor, and A. J. H. Vinck, Power line communications: Guest editorial, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 24(7), 1261–1266, Jul. 2006, Special Issue on Power Line Communications.
5. E. Biglieri, Coding and modulation for a horrible channel, *IEEE Commun. Mag.*, 41(5), 92–98, May 2003.
6. L. Lampe, A. M. Tonello, and D. Shaver, Power line communications for automation networks and smart grid, *IEEE Commun. Mag.*, 49(12), 26–27, Dec. 2011.
7. J. Anatory, M. V. Ribeiro, A. M. Tonello, and A. Zeddami, Power-line communications: Smart grid, transmission, and propagation, *J. Electric. Comp. Eng.*, 2013, 1–2, 2013.
8. I. H. Cavdar, Performance analysis of FSK power line communications systems over the time-varying channels: Measurements and modelling, *IEEE Trans. Power Delivery*, 19(1), 111–117, Jan. 2004.
9. F. J. Cañete, J. A. Cortés, L. Díez, and J. T. Entrambasaguas, Analysis of the cyclic short-term variation of indoor power line channels, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 24(7), 1327–1338, Jul. 2006.
10. S. Barmada, A. Musolino, and M. Raugi, Innovative model for time-varying power line communication channel response evaluation, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 24(7), 1317–1326, Jul. 2006.
11. F. J. Cañete, L. Díez, J. A. Cortés, and J. T. Entrambasaguas, Broadband modelling of indoor power-line channels, *IEEE Trans. Consumer Electron.*, 48(1), 175–183, Feb. 2002.
12. F. J. Cañete, L. Díez, and J. T. Entrambasaguas, A time variant model for indoor power-line channels, in *Proc. Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Malmö, Sweden, Apr. 4–6, 2001, 85–90.
13. M. Antoniali and A. M. Tonello, Measurement and characterization of load impedances in home power line grids, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 63(3), 548–556, Mar. 2014.
14. T.-E. Sung, A. Scaglione, and S. Galli, Time-varying power line block transmission models over doubly selective channels, in *Proc. IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Jeju Island, Korea, Apr. 2–4, 2008, 193–198.
15. H. Philipps, Modelling of power line communication channels, in *Proc. Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Lancaster, UK, Mar. 30–Apr. 1, 1999, 14–21.
16. M. Zimmermann and K. Dostert, A multipath signal propagation model for the power line channel in high frequency range, in *Proc. Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Lancaster, UK, Mar. 30–Apr. 1, 1999, 45–51.
17. ———, A multipath model for the power line channel, *IEEE Trans. Commun.*, 50(4), 553–559, Apr. 2002.
18. K. Dostert, Propagation channel characterization and modeling: Outdoor power supply grids as communication channels, in *Proc. IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Vancouver, Canada, Apr. 6–8, 2005, Keynote Talk.
19. A. M. Tonello, F. Versolatto, and A. Pittolo, In-home power line communication channel: Statistical characterization, *IEEE Trans. Commun.*, 62(6), 2096–2106, Jun. 2014.
20. J. S. Barnes, A physical multi-path model for power distribution network propagation, in *Proc. Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Tokyo, Japan, Mar. 24–26, 1998, 76–89.
21. T. C. Banwell and S. Galli, A new approach to the modeling of the transfer function of the power line channel, in *Proc. Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Malmö, Sweden, Apr. 4–6, 2001, 319–324.
22. T. Sartenaer and P. Delogne, Powerline cables modelling for broadband communications, in *Proc. Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Malmö, Sweden, Apr. 4–6, 2001, 331–337.
23. T. Calliacoudas and F. Issa, Multiconductor transmission lines and cables solver, an efficient simulation tool for PLC networks development, in *Proc. Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Athens, Greece, Mar. 27–29, 2002.
24. T. Esmailian, F. R. Kschischang, and P. G. Gulak, An in-building power line channel simulator, in *Proc. Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Athens, Greece, Mar. 27–29, 2002.
25. ———, In-building power lines as high-speed communication channels: Channel characterization and a test-channel ensemble, *International Journal of Communications Systems*, 16(5), 381–400, Jun. 2003, Special Issue: Powerline Communications and Applications.
26. T. C. Banwell and S. Galli, A novel approach to accurate modeling of the indoor power line channel – Part I: Circuit analysis and companion model, *IEEE Trans. Power Delivery*, 20(2), 655–663, Apr. 2005.
27. S. Galli and T. Banwell, A novel approach to the modeling of the indoor power line channel – Part II: transfer

- function and its properties, *IEEE Trans. Power Delivery*, 20(3), 1869–1878, Jul. 2005.
28. S. Galli and T. C. Banwell, A deterministic frequency-domain model for the indoor power line transfer function, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 24(7), 1304–1316, Jul. 2006.
  29. R. Hashmat, P. Pagani, A. Zeddami, and T. Chonavel, MIMO communications for inhome PLC networks: Measurements and results up to 100 MHz, in *Proc. IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Rio de Janeiro, Brazil, Mar. 28–31, 2010, 120–124.
  30. A. M. Tonello, F. Versolatto, B. Béjar, and S. Zazo, A fitting algorithm for random modeling the PLC channel, *IEEE Trans. Power Delivery*, 27(3), 1477–1484, Jul. 2012.
  31. A. M. Tonello and F. Versolatto, Bottom-up statistical PLC channel modeling – Part II: Inferring the statistics, *IEEE Trans. Power Delivery*, 25(4), 2356–2363, Oct. 2010.
  32. ———, Bottom-up statistical PLC channel modeling – Part I: Random topology model and efficient transfer function computation, *IEEE Trans. Power Delivery*, 26(2), 891–898, Apr. 2011.
  33. T. C. Banwell and S. Galli, On the symmetry of the power line channel, in *Proc. Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Malmö, Sweden, Apr. 4–6, 2001, 325–330.
  34. S. D’Alessandro and A. M. Tonello, On rate improvements and power saving with opportunistic relaying in home power line networks, *EURASIP J. Advances Signal Process.*, Sep. 2012, 1–17.
  35. A. Pittolo and A. M. Tonello, Physical layer security in PLC networks: An emerging scenario, other than wireless, *IET Commun.*, 8(8), 1239–1247, 2014.
  36. M. Schwartz, The origins of carrier multiplexing: Major George Owen Squier and AT&T, *IEEE Commun. Mag.*, 46(5), 20–24, May 2008.
  37. IEEE P1901 draft standard for broadband over power line networks: Medium access control and physical layer specifications, IEEE Standards Association, Draft Standard, Informative Annex, Chapter 3: Theoretical/Mathematical Channel Models for BPL Systems.
  38. H. Li, D. Liu, J. Li, and P. Stoica, Channel order and RMS delay spread estimation for AC power line communications, *Digital Signal Processing*, 13(2), 284–300, Apr. 2003.
  39. Y.-H. Kim, H.-H. Song, J.-H. Lee, and S.-C. Kim, Wideband channel measurements and modeling for in-house power line communication, in *Proc. Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Athens, Greece, Mar. 27–29, 2002.
  40. K. H. Afkhamie, H. Latchman, L. Yonge, T. Davidson, and R. E. Newman, Joint optimization of transmit pulse shaping, guard interval length, and receiver side narrow-band interference mitigation in the HomePlugAV OFDM system, in *Proceedings IEEE Workshop on Signal Processing and Advanced Wireless Communications*, New York City, USA, Jun. 5–8, 2005, 996–1000.
  41. Powerline channel data, Contribution to ITU-T SG15Q4 Working Group, Geneva, Switzerland, Standard Document B07-05-15 (NIPP-NAI-2007-107R1), Jun. 2007.
  42. B. O’Mahony, Field testing of high-speed power line communications in North American homes, in *Proc. IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Orlando, USA, Mar. 26–29, 2006, 155–159.
  43. S. Galli, A simplified model for the indoor power line channel, in *Proc. IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Dresden, Germany, Mar. 29–Apr. 1, 2009, 13–19.
  44. A. Schwager, L. Stadelmeier, and M. Zumkeller, Potential of broadband power line home networking, in *Proc. IEEE Consum. Commun. Netw. Conf.*, Las Vegas, USA, Jan. 3–6, 2005, 359–363.
  45. F. M. Tesche, B. A. Renz, R. M. Hayes, and R. G. Olsen, Development and use of a multiconductor line model for PLC assessments, in *Proc. Int. Zurich Symp. Electromagn. Compat.*, Zurich, Switzerland, Feb. 18–20, 2003, 99–104.
  46. J.-J. Lee, S.-J. Choi, H.-M. Oh, W.-T. Lee, K.-H. Kim, and D.-Y. Lee, Measurements of the communications environment in medium voltage power distribution lines for wide-band power line communications, in *Proc. Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Zaragosa, Spain, Mar. 31–Apr. 2, 2004, 69–74.
  47. P. Amirshahi and M. Kavehrad, High-frequency characteristics of overhead multiconductor power line for broadband communications, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 24(7), 1292–1303, Jul. 2006.
  48. F. Versolatto, A. M. Tonello, C. Tornelli, and D. Della Giustina, Statistical analysis of broadband underground medium voltage channels for PLC applications, in *IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun.*, Venice, Italy, Nov. 3–6, 2014, 493–498.
  49. M. D’Amore and M. S. Sarto, A new formulation of lossy ground return parameters for transient analysis of multiconductor dissipative lines, *IEEE Trans. Power Delivery*, 12(1), 303–314, Jan. 1997.
  50. J. R. Carson, Wave propagation in overhead wires with ground return, *Bell Syst. Tech. J.*, 5(4), 539–554, Oct. 1926.
  51. H. Kikuchi, Wave propagation along an infinite wire above ground at high frequencies, *Electrotech. J.*, 2, 73–78, Dec. 1956.

52. T. Sartenaer and P. Delogne, Deterministic modeling of the (shielded) outdoor power line channel based on the multiconductor transmission line equations, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 24(7), 1277–1291, Jul. 2006.
53. Signalling on low voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148.5 kHz, European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), Brussels, Belgium, Standard EN 50065-1, 1991.
54. H. Meng, S. Chen, Y.L. Guan, C.L. Law, P.L. So, E. Gunawan, and T.T. Lie, Modeling of transfer characteristics for the broadband power line communication channel, *IEEE Trans. Power Delivery*, 19(3), 1057–1064, Jul. 2004.
55. H. He, S. Cheng, Y. Zhang, and J. Nguimbis, Analysis of reflection of signal transmitted in low-voltage powerline with complex wavelet, *IEEE Trans. Power Delivery*, 19(1), 86–91, Jan. 2004.
56. A. M. Tonello, Wide band impulse modulation and receiver algorithms for multiuser power line communications, *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, 2007, article ID 96747.
57. O. G. Hooijen, On the relation between network-topology and power line signal attenuation, in *Proc. Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Tokyo, Japan, Mar. 24–26, 1998, 45–56.
58. D. Anastasiadou and T. Antonakopoulos, Multipath characterization of indoor power-line networks, *IEEE Trans. Power Delivery*, 20(1), 90–99, Jan. 2005.
59. C. R. Paul, *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*. John Wiley & Sons, Chichester, 1994.
60. —, Decoupling the multiconductor transmission line equations, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 44(8), 1429–1440, Aug. 1996.
61. —, A SPICE model for multiconductor transmission lines excited by an incident electromagnetic field, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 36(4), 342–354, Nov. 1994.
62. S. Galli, T. Banwell, and D. Waring, Power line based LAN on board the NASA space shuttle, in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, 2, Milan, Italy, May 17–19, 2004, 970–974.
63. T. Huck, J. Schirmer, T. Hogenmuller, and K. Dostert, Tutorial about the implementation of a vehicular high speed communication system, in *Proc. IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Vancouver, Canada, Apr. 6–8, 2005, 162–166.
64. A. M. Tonello and F. Versolatto, New results on top-down and bottom-up statistical PLC channel modeling, in *Proc. Workshop Power Line Commun.*, Udine, Italy, Oct. 1–2, 2009.
65. M. Tlich, A. Zeddani, F. Moulin, and F. Gauthier, Indoor power-line communications channel characterization up to 100 MHz – Part I: One-parameter deterministic model, *IEEE Trans. Power Delivery*, 23(3), 1392–1401, Jul. 2008.
66. B. Glance and L. J. Greenstein, Frequency-selective fading effects in digital mobile radio with diversity combining, *IEEE Trans. Commun.*, 31(9), 1085–1094, Sep. 1983.
67. K. Dostert and S. Galli, Keynote II: Modelling of electrical power supply systems as communication channels, in *Proc. IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Vancouver, Canada, Apr. 6–8, 2005, 137.
68. M. Götz, M. Rapp, and K. Dostert, Power line channel characteristics and their effect on communication system design, *IEEE Commun. Mag.*, 42(4), 78–86, Apr. 2004.
69. M. Arzberger, K. Dostert, T. Waldeck, and M. Zimmermann, Fundamental properties of the low voltage power distribution grid, in *Proc. Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Essen, Germany, Apr. 2–4, 1997, 45–50.
70. O. G. Hooijen, *Aspects of Residential Power Line Communications*. Aachen, Germany: Shaker Verlag, 1998.
71. M. Arzberger, *Datenkommunikation auf elektrischen Verteilnetzen für erweiterte Energiedienstleistungen*. Logos Verlag Berlin, 1998.
72. T. Waldeck, Einzel- und Mehrträgerverfahren für die störresistente Kommunikation auf Energieverteilnetzen (in German), Ph.D. dissertation, Logos Verlag, Berlin, Germany, 2000.
73. M. Babic, M. Hagenau, K. Dostert, and J. Bausch, Theoretical postulation of PLC channel models, the OPERA IST Integrated Project, Technical Report, 2005.
74. S. Galli, A novel approach to the statistical modeling of wireline channels, *IEEE Trans. Commun.*, 59(5), 1332–1345, Mar. 2011.
75. V. Degardin, M. Lienard, and P. Degauque, Transmission on indoor power lines: from a stochastic channel model to the optimization and performance evaluation of multicarrier systems, *Int. J. Commun. Syst.*, 16(5), 363–379, Jun. 2003, Special Issue: Powerline Communications and Applications.
76. I. C. Papaleonidopoulos, C. N. Capsalis, C. G. Karagiannopoulos, and N. J. Theodorou, Statistical analysis and simulation of indoor single-phase low voltage power-line communication channels on the basis of multipath propagation, *IEEE Trans. Consumer Electron.*, 49(1), 89–99, Feb. 2003.



## Κεφάλαιο 3 : Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα

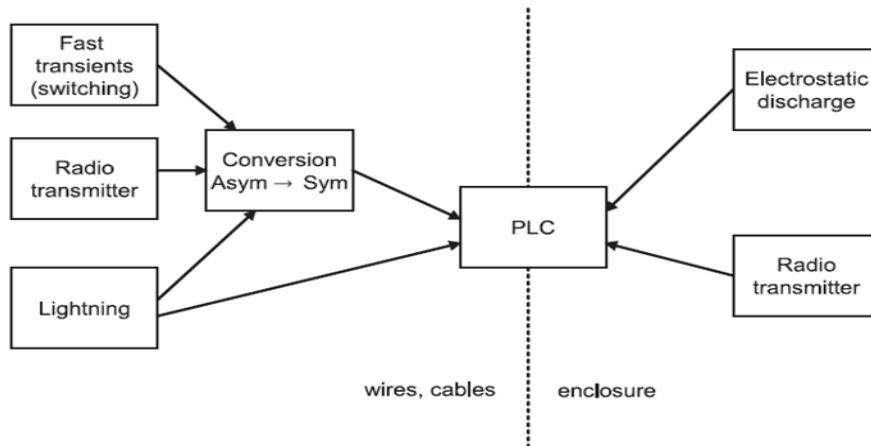
### 3.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) αποτελεί σημαντικό και μη τετριμμένο στοιχείο για την ανάπτυξη και λειτουργία συστημάτων επικοινωνίας γραμμής ισχύος (PLC).

Πρώτον, η είσοδος της παλμικής και της στενής ζώνης διαταραχής στο δίκτυο διανομής ενέργειας αποτελεί πρόκληση για τη μετάδοση σημάτων επικοινωνίας μέσω γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Δεύτερον, η ατελής συμμετρία των ηλεκτρικών γραμμών και των εγκαταστάσεων PLC οδηγεί στη μετατροπή των επιθυμητών συμμετρικών (διαφορικών) σημάτων σε ασύμμετρα σήματα (κοινής λειτουργίας), τα οποία μπορεί να προκαλέσουν παρεμβολές σε ραδιοφωνικούς δέκτες που βρίσκονται κοντά.

Τα μοντέλα διαταραχής για μια συσκευή PLC που είναι θύμα και μια πηγή παρεμβολών παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.1 και 3.2, αντίστοιχα. Στο ρόλο του ως θύματος παρεμβολών, μια συσκευή PLC υπόκειται σε πολλά ανθρωπογενή και φυσικά ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα. Συσκευές όπως μετασχηματισμένα τροφοδοτικά, φωτοβολταϊκοί μετατροπείς, μετατροπείς συχνότητας ή διακόπτες συνδεδεμένοι στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας παράγουν κυρίως παρορμητικό θόρυβο. Τα σήματα από τους πομπούς ραδιοφώνου εμφανίζονται ως ασύμμετρο σήμα στη γραμμή, που μετατρέπεται εν μέρει σε ένα συμμετρικό σήμα, το οποίο μπορεί στη συνέχεια να παρεμβαίνει στο επιθυμητό σήμα PLC. Από τα επιχειρήματα αμοιβαιότητας προκύπτει ότι ένα συμμετρικό σήμα PLC μπορεί να μετατραπεί σε ασύμμετρο σήμα και στη συνέχεια να εκπέμπεται από τη γραμμή ισχύος, εάν ξεπεραστεί κάποιος μήκος γραμμής (βλ. σχήμα 3.2). Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε παρεμβολές σε ραδιοφωνικούς δέκτες που βρίσκονται κοντά. Εκτός από αυτό το φαινόμενο, μερικοί ραδιοφωνικοί δέκτες με μια κεραία ράβδου και αποσύνδεση αδύναμης κοινής λειτουργίας στον συνδεδεμένο δικτύου μπορεί να διαταραχθούν άμεσα από την ασύμμετρη τάση.

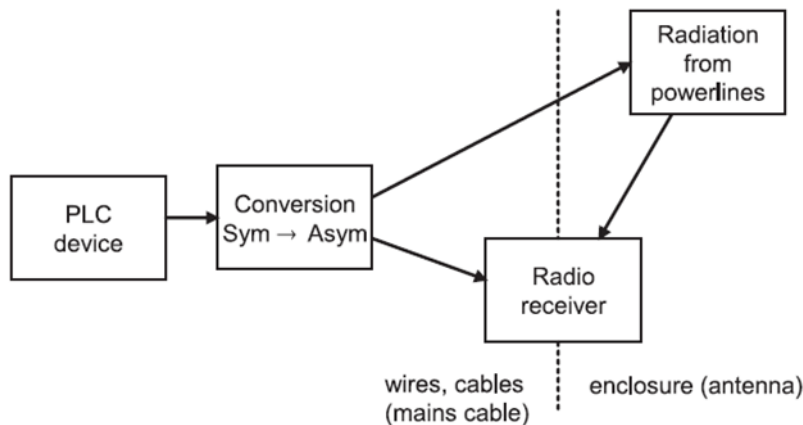
Μετά από αυτά τα μοντέλα διαταραχών, αυτό το κεφάλαιο εξετάζει λεπτομερώς τις προκλήσεις EMC για τις εγκαταστάσεις PLC.



Σχήμα 3.1 Εικονογράφηση του προβλήματος της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) με τη συσκευή PLC θύμα παρεμβολών.

### 3.2 Παράμετροι για τις εκτιμήσεις EMC

Σε εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης (LV), χρησιμοποιούνται καλώδια πολλαπλών συρμάτων τύπου τομέα ή κυκλικά. Και οι δύο τύποι καλωδίων έχουν συνήθως μια αδύναμη συστροφή για να βεβαιωθούν ότι οι μηχανικές δυνάμεις κατά τη διάρκεια



Σχήμα 3.2 Εικονογράφηση του προβλήματος της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας με δέκτη ραδιοσυχνότητων θύμα παρεμβολών.

της εγκατάστασης δεν θα προκαλέσουν βλάβη στη δομή του καλωδίου. Η μετάδοση σήματος στην περιοχή συχνοτήτων μικρότερη από 100 MHz είναι συγκρίσιμη με αυτή των άλλων καλωδίων που χρησιμοποιούνται για επικοινωνία όταν χρησιμοποιείται συμμετρική μετάδοση. Σε αυτή την περίπτωση το ηλεκτρομαγνητικό κύμα οδηγείται από τους αγωγούς μέσα στην καλά ελεγχόμενη μόνωση. Για ασύμμετρα σήματα (μεταξύ γραμμής και γης), το καθοδηγούμενο κύμα ταξιδεύει στο περιβάλλον του καλωδίου. Επομένως, οι ιδιότητες διάδοσης επηρεάζονται σημαντικά από αντικείμενα στο περιβάλλον.

Τα καλώδια μέσης τάσης (MV) έχουν συνήθως ασπίδα για τον έλεγχο του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο καλώδιο. Τα σύγχρονα καλώδια κατασκευάζονται ως ακτινωτά καλώδια πεδίου, δηλ. με ομοαξονική δομή. Ο κύριος μονωτήρας είναι κατασκευασμένος από πολυαιθυλένιο, το οποίο χρησιμοποιείται επίσης σε ομοαξονικά καλώδια για μετάδοση σήματος υψηλής συχνότητας (καλώδια μέτρησης, καλώδια κεραίας κλπ.). Τα χαρακτηριστικά μετάδοσης των καλωδίων MV είναι επομένως πολύ παρόμοια με εκείνα των άλλων ομοαξονικών καλωδίων.

Οι εναέριες γραμμές στα δίκτυα διανομής LV και MV συμπεριφέρονται πολύ παρόμοια με τα καλώδια που χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής χαμηλής τάσης στα κτίρια. Οι κυριότερες διαφορές είναι η μόνωση, η οποία είναι ο αέρας αντί του πλαστικού και η απόσταση μεταξύ των αγωγών.

Εάν τέτοια καλώδια ισχύος θα χρησιμοποιηθούν μόνο για επικοινωνία από σημείο σε σημείο μεταξύ δύο μόντεμ PLC, η EMC του PLC (λαμβάνοντας υπόψη τις παρεμβολές που παράγει το PLC) δεν θα αμφισβητηθεί. Εντούτοις, ένα δίκτυο PLC περιλαμβάνει πολλά σημεία διασύνδεσης, διακόπτες κ.λπ., τα οποία προκαλούν ασυμμετρίες και συνεπώς μετατροπές διαφορικού προς κοινή λειτουργία. Όσον αφορά την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC), ένα σήμα κοινής λειτουργίας μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές σε ραδιοφωνικούς δέκτες που λειτουργούν κοντά ή συνδεδεμένοι στη γραμμή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η παρεμβολή είναι μερικές τάξεις μεγέθους υψηλότερη από εκείνη που προκαλείται από συμμετρικά σήματα.

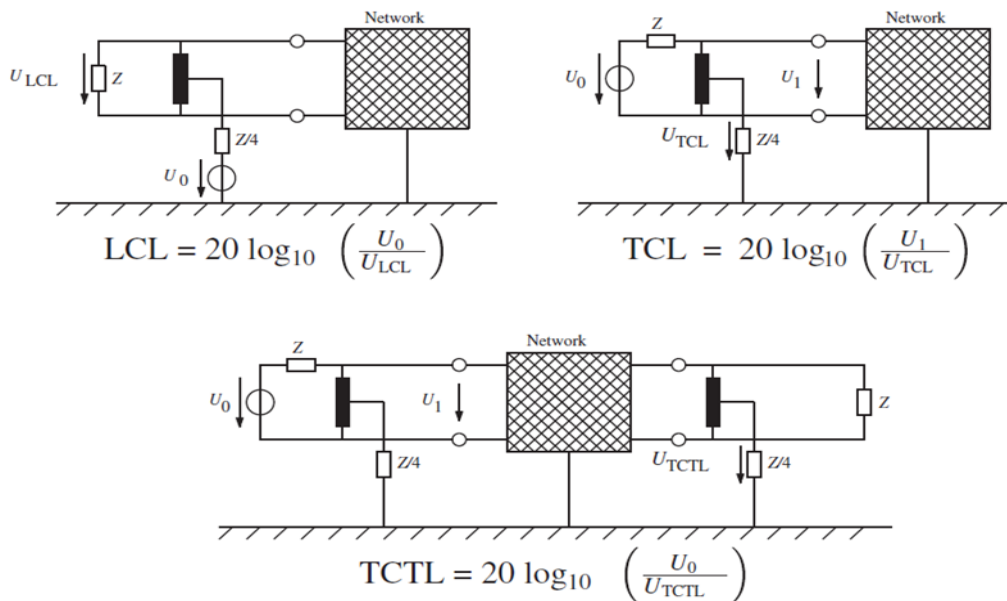
Αν και τα σύγχρονα καλώδια MV είναι χτισμένα ως ομοαξονικά καλώδια, μπορεί να υπάρχει ένα σήμα κοινού τρόπου λειτουργίας στο καλώδιο, καθώς η θωράκιση και η σύνδεσή της είναι σχεδιασμένες για να ελαχιστοποιούν τις απώλειες ισχύος. Τεχνικές όπως η σταυρωτή σύνδεση, όπου οι ασπίδες των τριών ξεχωριστών καλωδίων φάσης είναι κυκλικά εναλλασσόμενες κατά μήκος του δίσκου καλωδίων, είναι πολύ συχνές.

Για τον χαρακτηρισμό της EMC δικτύων με τον προσαρτημένο εξοπλισμό της, πρέπει να είναι γνωστές οι ιδιότητες συμμετρίας του δικτύου. Για τις τηλεπικοινωνιακές γραμμές είναι μια καθιερωμένη μέθοδος για τον χαρακτηρισμό της απώλειας διαμήκους μετατροπής (LCL) της γραμμής και για την προσομοίωση αυτής της τιμής από ένα δίκτυο μέτρησης (δίκτυο σταθεροποίησης αντίστασης (ISN)).

Για τη μέτρηση του LCL, εισάγεται ένα σήμα κοινής λειτουργίας σε μια θύρα δικτύου και το σήμα διαφορικής λειτουργίας ULCL μετράται στην ίδια θύρα (βλ. Εικόνα 3.3, επάνω αριστερά). Το LCL είναι η σχέση της εισαγόμενης και της μετρούμενης τάσης και παρέχει ένα μέτρο για την ασυμμετρία του δικτύου. Ωστόσο, ενδέχεται να μην είναι κατάλληλη η μέθοδος μιας θύρας για τον χαρακτηρισμό των εγκαταστάσεων PLC. Αν υπάρχει μια εξασθένιση στη

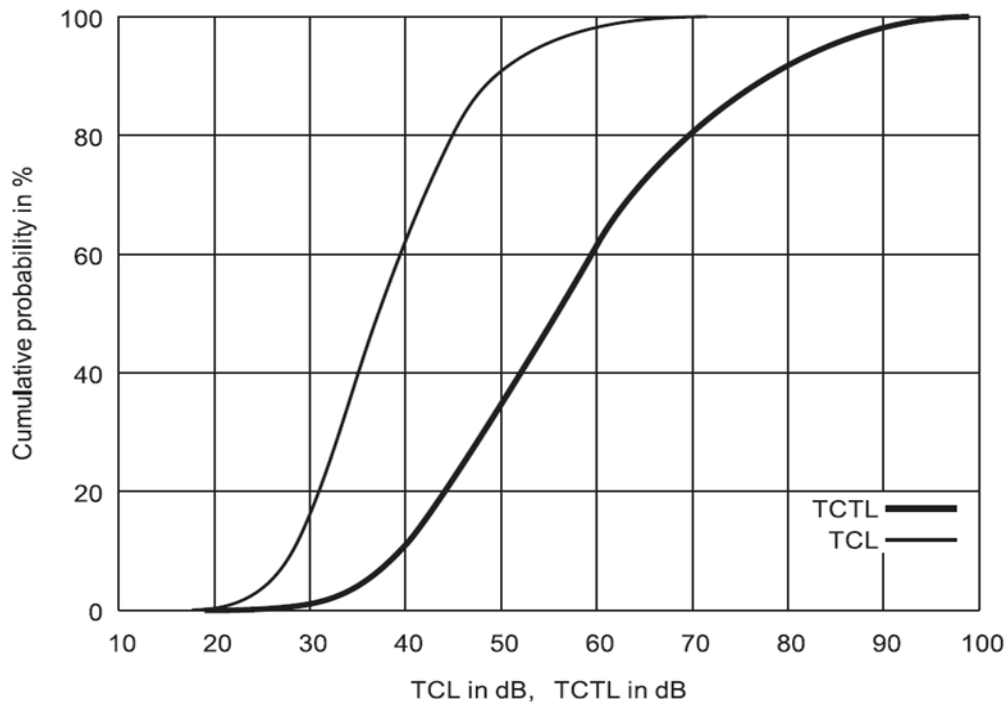
γραμμή και ένα τοπικό σημείο ασυμμετρίας κάπου μέσα στο δίκτυο, η τιμή LCL που μετράται θα είναι υψηλότερη από την πραγματική LCL, εάν η μέτρηση έγινε απευθείας σε αυτό το σημείο ασυμμετρίας.

Επομένως, η εγκάρσια απώλεια μεταφοράς μετατροπής (TCTL) γίνεται σημαντική ποσότητα. Ορίζει τη σχέση του συμμετρικού σήματος εκκίνησης PLC  $U_0$  με το ασύμμετρο σήμα  $U_{TCTL}$  που εμφανίζεται σε άλλη θύρα του δικτύου (βλ. Σχήμα 3.3, κάτω). Στην περίπτωση PLC, αυτό αντιπροσωπεύει την κατάσταση που, για παράδειγμα, ένα μόντεμ PLC εισάγει ένα σήμα σε μία πρίζα και ένας ραδιοφωνικός δέκτης είναι συνδεδεμένος σε άλλη πρίζα του ίδιου δικτύου γραμμών ρεύματος. Ο ραδιοφωνικός δέκτης μπορεί τότε να βιώσει μια κοινή τάση λειτουργίας που ταξιδεύει κατά μήκος του καλωδίου τροφοδοσίας του. Δεδομένου ότι οι ραδιοφωνικοί δέκτες με χαμηλότερες τιμές με μια ενσωματωμένη κεραία ράβδου χρησιμοποιούν το καλώδιο τροφοδοσίας ως μέρος της κεραίας λήψης (τουλάχιστον ως πόδι), αυτή η τάση κοινής λειτουργίας μπορεί να προκαλέσει ραδιοπαρεμβολές.



Σχήμα 3.3 Μερικές σημαντικές ποσότητες που χαρακτηρίζουν τη συμμετρία των δικτύων.

Μια στατιστική αξιολόγηση ενός μεγάλου αριθμού μετρήσεων TCTL που πραγματοποιήθηκαν σε ιδιωτικά νοικοκυριά σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4. Μπορεί να φανεί ότι το TCTL είναι μόνο για το 20% όλων των περιπτώσεων 45 dB ή λιγότερο.



Σχήμα 3.4 Στατιστικά στοιχεία TCL και TCTL για δίκτυα LV.

Με άλλα λόγια, στο 80% όλων των περιπτώσεων το μετατρεπόμενο σήμα κοινής λειτουργίας κάπου στο δίκτυο είναι περισσότερο από 45 dB κάτω από το επίπεδο του εισαγόμενου σήματος. Αν το σήμα κοινού τρόπου μετράται στην ίδια θυρίδα με εκείνη που χρησιμοποιείται για την εισαγωγή (μέθοδος με μία θύρα), τότε επιτυγχάνεται η εγκάρσια απώλεια μετατροπής (TCL) (βλ. Εικόνα 3.3, επάνω δεξιά). Το σχήμα 3.4 δείχνει επίσης την στατιστική για το TCL που λαμβάνεται από τις ίδιες θέσεις μέτρησης που χρησιμοποιούνται για το TCTL. Σημειώνουμε ότι η TCL μιας θύρας παρέχει μια χειρότερη εκτίμηση για την ασυμμετρία των δικτύων, η οποία σε επίπεδο PLC αντιστοιχεί στο σενάριο ότι ένα μόντεμ PLC και ένας ραδιοφωνικός δέκτης είναι συνδεδεμένοι στην ίδια πρίζα.

### 3.3 Σύζευξη μεταξύ γραμμής ισχύος και άλλων συστημάτων επικοινωνιών μέσω καλωδίων

Αυτή η ενότητα είναι αφιερωμένη στις πτυχές της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας που ασχολούνται με τη σύζευξη μεταξύ ενός συστήματος PLC και άλλων συστημάτων καλωδιακής επικοινωνίας εντός του οικιακού περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα, εστιάζει στον χαρακτηρισμό της σύζευξης μεταξύ συστημάτων PLC και VDSL2. Ενώ το PLC χρησιμοποιεί τις υπάρχουσες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, το VDSL2 χρησιμοποιεί τις υπάρχουσες τηλεπικοινωνιακές γραμμές. Καθώς οι γραμμές των δύο δικτύων (η ηλεκτρική ενέργεια και οι τηλεπικοινωνίες) είναι σχετικά στενές μεταξύ τους, είναι πολύ σημαντικό να εξεταστεί η

αμοιβαία επίδραση των PLC και VDSL2.

Η τεχνολογία VDSL2 περιγράφεται στη σύσταση ITU-T G993.3 (Διεθνής Τηλεπικοινωνιακή Ένωση - Τηλεπικοινωνιακός τομέας τυποποίησης) και οι εταιρείες τηλεφωνίας ανησυχούν για την επίδραση της μετάδοσης PLC στην παροχή υπηρεσιών μέσω του VDSL2, όπου οι δύο τεχνολογίες έχουν επικάλυψη στην περιοχή συχνοτήτων (τα σχέδια μάλιστα που χρησιμοποιούνται από τις δύο τεχνολογίες είναι 1,8 MHz-30 MHz για το PLC και 138 kHz-30 MHz για το VDSL2).

Προκειμένου να διασφαλιστεί η συνύπαρξη και των δύο τεχνολογιών στα οικιακά δίκτυα, είναι σημαντικό να χαρακτηριστούν οι παρεμβολές που παράγονται στις τηλεφωνικές γραμμές από την PLC και εκείνες που παράγονται στις ηλεκτρικές γραμμές από το VDSL2. Όταν είναι γνωστή η σύζευξη μεταξύ των δύο δικτύων, καθίσταται δυνατή η μελέτη και εφαρμογή τεχνικών μετριασμού που επιτρέπουν μια μετάδοση με καλές επιδόσεις και αποδεκτή QoS τόσο για τα συστήματα PLC όσο και για τα συστήματα VDSL2.

### 3.4 Χαρακτηρισμός της σύζευξης μεταξύ Γραμμής Ισχύος και Γραμμής Τηλεπικοινωνιών Μέσα στο Περιβάλλον Χώρου

Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή λαμβάνει χώρα όταν ένα σήμα που παράγεται από ένα σύστημα μεταφέρεται μέσω ηλεκτρομαγνητικής ζεύξης σε άλλο σύστημα.

Conductive	Συμβαίνει μέσω μιας κοινής πορείας. Η αγωγιμότητα σύζευξης πραγματοποιείται σε διαφορετικά κυκλώματα με κοινό σύστημα αγωγών αναφοράς.
Capacitive	Εμφανίζεται μέσω του ηλεκτρικού πεδίου. Υπάρχει χωρητική σύζευξη μεταξύ γειτονικών κυκλωμάτων όπως μεταξύ κυκλωμάτων ισχύος και γραμμών σήματος.
Inductive	Εμφανίζεται μέσω του μαγνητικού πεδίου. Η επαγωγική σύζευξη προκαλείται σε παράλληλες γραμμές λειτουργίας, όπως καλώδια και αγωγοί καλωδίων.
Wave or Radiation influence	Εμφανίζεται μέσω του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Πίνακας 3. 1 Διαφορετικοί τύποι ζεύξης

Οι παρεμβολές εμφανίζονται γενικά υπό τη μορφή ηλεκτρικής τάσης, ρεύματος, ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Οι διάφοροι μηχανισμοί σύζευξης συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1.

Τα παρεμβαλλόμενα σήματα μεταφέρονται γενικά κατά μήκος ενός αγωγίμου σύρματος (καθοδηγούμενη παρεμβολή) ή μέσω του χώρου (ακτινοβολούμενη παρεμβολή). Αυτοί οι δύο τύποι παρεμβολών μπορούν να βρεθούν μαζί και να συνδεθούν με τις εισόδους, τις εξόδους και τις γραμμές τροφοδοσίας και επικοινωνίας. Η σχετική σημασία κάθε σύζευξης καθοδηγείται από την αναλογία μεταξύ των μηκών κύματος του παρεμβαλλόμενου σήματος και των

χαρακτηριστικών μετρήσεων των υπό μελέτη συνιστωσών του συστήματος. Εάν το μήκος κύματος του παρεμβαλλόμενου σήματος είναι μεγαλύτερο από τις χαρακτηριστικές μετρήσεις του αγώγιμου συστήματος, η χωρητική και επαγωγική σύζευξη μπορεί να συμβεί ανεξάρτητα η μία από την άλλη. Διαφορετικά, οι μηχανισμοί επιρροής διέπονται από:

- Επιρροή κύματος, η οποία είναι ένας συνδυασμός χωρητικής και επαγωγικής σύζευξης παράλληλων γραμμών. Στην περίπτωση αυτή, το κύμα διάδοσης αποτελεί την πηγή παρεμβολής.

- Ακτινοβολούμενη σύζευξη μέσω του χώρου, η οποία οδηγεί στη μεταφορά ενέργειας σε όλο το ηλεκτρο-μαγνητικό πεδίο στους δέκτες.

Οι κύριοι τύποι παρεμβολών είναι η κοινή λειτουργία και η παρεμβολή διαφορικού. Συνήθως, η παρεμβολή λαμβάνει χώρα ως σήμα κοινού τρόπου λειτουργίας, το οποίο στη συνέχεια παράγει ένα σήμα διαφορικής λειτουργίας παρεμβολής λόγω ασυμμετρίας του κυκλώματος. Αυτό το σήμα διαφορικής λειτουργίας στη συνέχεια υπερτίθεται στο χρήσιμο σήμα (διαφορική λειτουργία). Οποιαδήποτε ασυμμετρία στα ηλεκτρικά κυκλώματα θα δημιουργήσει μια τέτοια μετατροπή κοινού τρόπου λειτουργίας διαφορικού, η οποία θα έχει αντίκτυπο στις επιδόσεις της μετάδοσης και στην αποδεκτή QoS τόσο για τα συστήματα PLC όσο και για τα συστήματα VDSL2.

Η ποσότητα συζευγμένων παρεμβολών και η επίδρασή τους στα χρήσιμα σήματα εξαρτώνται από διαφορετικές παραμέτρους όπως το μήκος και την απόσταση μεταξύ των ηλεκτρικών γραμμών και των γραμμών επικοινωνιών, η τοπολογία των ηλεκτρικών δικτύων, οι σύνθετες αντιστάσεις των διαταραγμένων γραμμών κλπ. Η μείωση των ηλεκτρομαγνητικών επιδράσεων γίνεται γενικά με την υιοθέτηση EMC μέτρων που βασίζονται στις ακόλουθες δύο αρχές:

- Μέτρα που λαμβάνονται σε πηγές παρεμβολών προκειμένου να περιοριστεί η μετάδοσή τους.

- Μέτρα που λαμβάνονται για τον περιορισμό της εξάπλωσης των παρεμβολών.





## Κεφάλαιο 4 : Ζεύξη

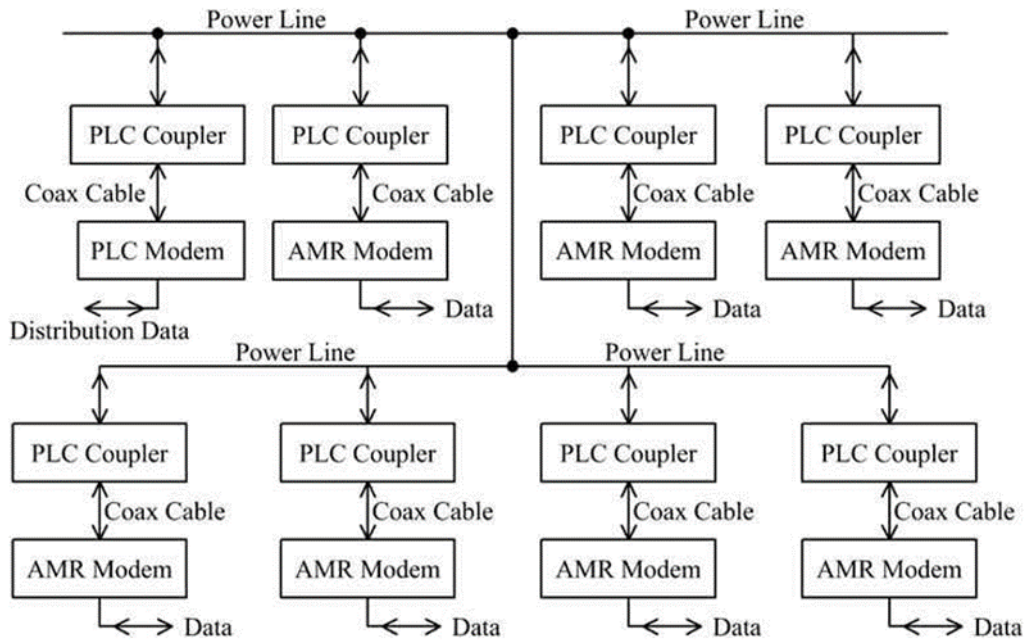
### 4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, εξετάζουμε τη σύνδεση των σημάτων επικοινωνίας γραμμής ισχύος (PLC) προς και από τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλής τάσης (LV), μέσης τάσης (MV) και υψηλής τάσης (HV). Χαρακτηριστικά το HV καλύπτει τάσεις από 66 kV και άνω, τα καλύμματα MV κυμαίνονται από 7,2 kV έως 33 kV και η LV καλύπτει τα 110 V έως 400 V. Ο συζευκτήρας PLC μας επιτρέπει να συνδέσουμε ένα μόντεμ PLC με γραμμές HV / MV / LV και να εγχύσουμε ένα σήμα PLC να μεταδίδονται στη γραμμή ισχύος, με χαμηλή απώλεια σύνδεσης. Ο ίδιος ζεύκτης μας επιτρέπει επίσης να ανακτήσουμε ένα σήμα PLC που θα ληφθεί από τη γραμμή ισχύος με επαρκή λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) για να επιτραπεί η χωρίς κωδικοποίηση σφάλματος αποκωδικοποίηση του σήματος PLC. Οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται για το PLC μπορούν να είναι υπερυψωμένες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε πύργους ή πόλους και μπορούν να είναι υπόγεια καλώδια. Το σχήμα 4.1 δείχνει ένα βασικό σύστημα PLC για αυτοματοποιημένη μέτρηση (AMR), συμπεριλαμβανομένων των ζευκτών. Ο συζευκτήρας πρέπει να προστατεύει τόσο τους ανθρώπους όσο και τα μόντεμ PLC από τις τάσεις του δικτύου, οι οποίες κυμαίνονται από 110 V για γραμμές ηλεκτρικής τάσης χαμηλής τάσης έως 1000 kV για γραμμές υψηλής τάσης.

Οι γραμμές μεταφοράς ενέργειας είναι ένα πολύ θορυβώδες μέσο επικοινωνίας και για να επιτευχθεί το καλύτερο SNR στο μόντεμ λήψης, η απώλεια εισαγωγής των ζευκτών πομπού πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη. Αυτό απαιτεί την αντιστοίχιση της αντίστασης της θύρας γραμμής ισχύος του ζεύκτη με τη γραμμή ισχύος και την αντιστάθμιση των θυρίδων έγχυσης που ταιριάζουν με το καλώδιο που συνδέεται με το ζεύκτη και το υλικό του μόντεμ PLC. Συχνά αυτή η σύνθετη αντίσταση είναι 75 Ω ή 50 Ω, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα χαμηλού κόστους ομοαξονικό καλώδιο μεταξύ του ζεύκτη και του μόντεμ. Για τη λήψη σημάτων PLC, η απώλεια εισαγωγής του ζεύκτη είναι λιγότερο σημαντική, δεδομένου ότι κανονικά ο θόρυβος που προκαλείται από τον άνθρωπο είναι πολύ μεγαλύτερος από τον θερμικό θόρυβο, έτσι ώστε το λαμβανόμενο SNR να παραμείνει το ίδιο, ακόμη και με μια λογική απώλεια ζεύκτη. Δεδομένου ότι κάθε ζεύκτης χρησιμοποιείται κανονικά τόσο για τη μετάδοση όσο και για τη λήψη, είναι σημαντική η χαμηλή απώλεια σύζευξης.

Ένα σύστημα PLC για γραμμές LV είναι διαφορετικό από ένα σύστημα σε γραμμές MV ή HV. Οι γραμμές LV καλύπτουν μικρές αποστάσεις και έχουν πολλούς κλάδους. Υπάρχει ένα

μόντεμ που λειτουργεί από τον διανομέα ηλεκτρικής ενέργειας, ο οποίος συνδέεται με έως και εκατό μόντεμ πελάτη για έξυπνες εφαρμογές μέτρησης όπως φαίνεται



Σχήμα 4.1 Δομικό διάγραμμα συστήματος επικοινωνιών LV PLC που δείχνει θέσεις ζεύκτη.

στο Σχήμα 4.1. Οι γραμμές ισχύος HV είναι μεγάλες και κανονικά δεν έχουν κλάδους μεταξύ των σταθμών διανομής. Υπάρχει ένα μόντεμ σε κάθε άκρο της γραμμής και ένα διαφορετικό σύστημα PLC μπορεί να καλύψει την επόμενη τάση HV στην άλλη πλευρά του σταθμού διανομής.

Στο σχήμα 4.1, το μόντεμ PLC στο επάνω αριστερό μέρος είναι το μόντεμ που ελέγχεται από τον διανομέα ηλεκτρικής ενέργειας και το οποίο στέλνει δεδομένα σε όλα τα μόντεμ PLC πελατών, τα οποία έχουν χαρακτηριστεί μόντεμ AMR, για να τα διακρίνουν από το μόντεμ που λειτουργεί από τον διανομέα ηλεκτρικής ενέργειας. Για τα συστήματα LV PLC, ο διαμορφωτής AMR και ο συζεύκτης PLC είναι κανονικά ενσωματωμένοι, ωστόσο δεδομένου ότι πρόκειται για ένα κεφάλαιο για συζεύκτες PLC, το μόντεμ εμφανίζεται ως ξεχωριστή μονάδα συνδεδεμένη μέσω ομοαξονικού καλωδίου.

Ανάλογα με τη χώρα, η τάση συχνότητας δικτύου LV είναι 110 V έως 230 V σε 50 Hz ή 60 Hz (φάση προς ουδέτερο) για τις γραμμές LV. Η συνήθης χαρακτηριστική αντίσταση για τα υπόγεια καλώδια ρεύματος LV είναι τυπικά 10 Ω έως 50 Ω, ανάλογα με την ικανότητα μεταφοράς ρεύματος γραμμής και περίπου 225 Ω για τις εναέριες γραμμές στα εγκάρσια μέλη [1]. Για τις γραμμές LV υπάρχουν συνήθως πολλοί κλάδοι, πολλοί ζεύκτες PLC και αρκετές εκατοντάδες οικιακές και βιομηχανικές συσκευές συνδεδεμένες στη γραμμή ισχύος. Ως αποτέλεσμα, η αντίσταση που παρατηρείται στη γραμμή ισχύος ποικίλλει σημαντικά ανάλογα

με το χρόνο και τη συχνότητα. Το Cavdar [2] έδειξε ότι στην περιοχή συχνοτήτων 10 kHz έως 150 kHz, η μετρούμενη αντίσταση γραμμής κυμαίνεται μεταξύ 1 Ω και 20 Ω και τείνει να αυξάνεται με συχνότητα. Ο Kim [3] μέτρησε την σύνθετη αντίσταση των γραμμών μεταφοράς ισχύος στην περιοχή συχνοτήτων 1 MHz έως 30 MHz και διαπίστωσε ότι η σύνθετη αντίσταση κυμαίνεται από <math>10 \Omega</math> έως <math>300 \Omega</math>, με μέση αντίσταση περίπου 50 Ω. Λόγω αυτής της μεγάλης ποικιλίας ισχύος της γραμμικής σύνθετης αντίστασης και της μεταβολής της σύνθετης αντίστασης χρόνου και συχνότητας των φορτίων που συνδέονται με αυτήν, είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί ένας σύνδεσμος χαμηλής απώλειας και συνεπώς η μέγιστη παροχή ισχύος του PLC σηματοδοτεί στη γραμμή ισχύος χωρίς να παρέχει κάποιες ρυθμίσεις προσαρμογής αντίστασης ως μέρος του σχεδιασμού ζεύκτη.

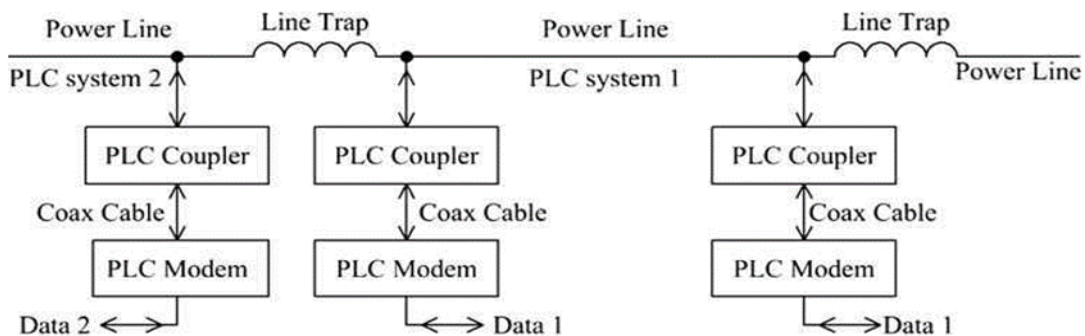
Για το σύστημα που φαίνεται στο σχήμα 4.1, η αντίσταση του μόντεμ μετάδοσης ταιριάζει ιδανικά με τη χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση της γραμμής μετάδοσης, για να εξασφαλίσει χαμηλή απώλεια συζεύξεως στη γραμμή και να βάλει το ίδιο σήμα PLC στη γραμμή ισχύος LV. Εξετάστε μια γραμμή ισχύος LV χωρίς κλαδιά που περιέχουν δίκτυο PLC, με ένα μόντεμ να μεταδίδει στο ένα άκρο της γραμμής και 20 μόντεμ που λαμβάνουν το σήμα PLC σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της γραμμής ρεύματος. Εάν η γραμμή ισχύος στη συχνότητα PLC έχει χαρακτηριστική αντίσταση 50 Ω, τότε ένα μόντεμ μετάδοσης με 50 Ω θα ταιριάζει καλά για να βάλει την ισχύ της στη γραμμή ισχύος. Εάν ένα μόντεμ λήψης παρουσιάζει την ίδια αντίσταση 50 Ω σε όλη τη γραμμή ισχύος, το πρώτο μόντεμ απορροφά το ήμισυ της ισχύος PLC στη γραμμή, το επόμενο μόντεμ απορροφά το ήμισυ της υπόλοιπης ισχύος, αφήνοντας το ένα τέταρτο της ισχύος PLC, το επόμενο μόντεμ απορροφά το μισό της ισχύος, αφήνοντας ένα όγδοο της ισχύος και ούτω καθεξής. Το 8ο μόντεμ θα μπορεί να απορροφά μόνο το 1/256 της μεταδιδόμενης ισχύος και η ισχύς που διατίθεται στο 20ο μόντεμ της γραμμής θα είναι -60,2 dB της μεταδιδόμενης ισχύος. Αυτό είναι απίθανο να είναι επαρκές σήμα για την απρόσκοπτη λειτουργία του μόντεμ. Εάν το μόντεμ λήψης προκαλεί σύνθετη αντίσταση 500 Ω σε όλη τη γραμμή ισχύος, το πρώτο μόντεμ λαμβάνει μόνο 1/11 της μεταδιδόμενης ισχύος, έτσι ώστε το  $10/11 = 0,909$  της μεταδιδόμενης ισχύος να είναι διαθέσιμο στο δεύτερο μόντεμ. Η ισχύς σήματος στο 20ο μόντεμ είναι τότε 0,148 της μεταδιδόμενης ισχύος ή -8,27 dB της μεταδιδόμενης ισχύος. Αυτό θα πρέπει να είναι ένα αρκετά μεγάλο σήμα για να επιτρέπει τη λήψη χωρίς λάθη. Κάθε μόντεμ απορροφά ένα σήμα PLC -10,4 dB της ισχύος σήματος στο μόντεμ, έτσι ώστε το τελευταίο μόντεμ να απορροφά ισχύ σήματος -18,7 dB κάτω από τη μεταδιδόμενη ισχύ σήματος. Ο περιορισμός της ισχύος λήψης σε κάθε μόντεμ δεν αποτελεί συνήθως πρόβλημα, καθώς το σήμα και ο τεχνητός θόρυβος είναι πολλές φορές μεγαλύτεροι από τον θερμικό θόρυβο, έτσι ώστε το SNR να μην μειώνεται με αυτή την απώλεια -18,7 dB. Για τα συστήματα LV PLC, είναι επομένως συνήθης πρακτική η ύπαρξη σύνθετης αντίστασης

εξόδου για ένα μόντεμ μετάδοσης και υψηλότερη σύνθετη αντίσταση εισόδου για ένα μόντεμ λήψης.

Για τη λειτουργία LV, ο συζεύκτης πρέπει να έχει μια καλή απόκριση συχνότητας τόσο για σύνθετη αντίσταση πηγής μόντεμ όσο και για σύνθετη αντίσταση φορτίου μόντεμ. Επιπλέον, ο συζεύκτης πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να έχει χαμηλή απώλεια ζεύξης για τη μετάδοση του σήματος PLC στη γραμμή μετάδοσης και το φορτίο που παρουσιάζει ο ζεύκτης κατά τη διάρκεια της λήψης δεν πρέπει να προκαλεί μεγάλη εξασθένιση στο σήμα PLC στη γραμμή LV. Για επαγωγική σύζευξη, τα μόντεμ LV και τα δίκτυα σύζευξης πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε οι αντιστάσεις που κάθε μόντεμ λήψης συνδέεται εν σειρά με τη γραμμή μεταφοράς να είναι πολύ μικρότερη από την αντίσταση που απαιτείται για χαμηλή απώλεια συζεύξεως. Ομοίως, για χωρητική σύζευξη, η αντίσταση που τοποθετείται από κάθε μόντεμ λήψης σε όλη την γραμμή ισχύος πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση που απαιτείται για χαμηλή απώλεια συζεύξεως.

Για τις γραμμές MV και HV υπάρχουν ελάχιστα μόντεμ λήψης για κάθε μόντεμ μετάδοσης και οι αντιστάσεις μετάδοσης και λήψης του μόντεμ μπορούν να επιλεγούν έτσι ώστε και οι δύο να έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλή απώλεια σύνδεσης από το δίκτυο ζεύξης.

Στο παράδειγμα στο Σχήμα 4.2, τα σήματα PLC είναι της τάξης των 10 V στη γραμμή ισχύος, ενώ τα σήματα συχνότητας δικτύου για μια γραμμή ισχύος 275 kV είναι 160 kV, γραμμή προς τη γείωση, που αντιστοιχεί σε ένα επιθυμητό σήμα PLC -84 dB σε ανεπιθύμητο λόγο σήματος δικτύου. Ο συζεύκτης πρέπει να προστατεύει τον άνθρωπο και τον εξοπλισμό PLC φιλτράροντας τα σήματα συχνότητας δικτύου και τις αρμονικές του, έτσι ώστε να είναι πολύ μικρότερα από τα σήματα PLC. Αυτό επιτρέπει στο μόντεμ να ανιχνεύει τα σήματα PLC χωρίς παρεμβολή και να αποδιαμορφώνει αυτά τα σήματα χωρίς σφάλματα. Για να διασφαλιστεί ότι όλο το σήμα 1 PLC δεδομένων, το οποίο εισάγεται στη γραμμή από τον ενδιάμεσο συζεύκτη PLC στο σχήμα, μετακινείται προς το δεξιό ζεύκτη PLC και ότι όλη η ενέργεια του PLC στη γραμμή κατευθύνεται έπειτα



Σχήμα 4.2 Δομικό διάγραμμα συστήματος επικοινωνιών HV PLC που δείχνει θέσεις ζεύξης και παγίδευσης γραμμών.

στο δεξιό συζεύκτη PLC, χωρίς να συνεχίζεται κατά μήκος της γραμμής ρεύματος, εισάγονται στη γραμμή οι μεγάλοι επαγωγείς ή οι παγίδες γραμμής όπως φαίνεται. Αυτές οι παγίδες γραμμών παρουσιάζουν υψηλή σύνθετη αντίσταση και επίσης εμποδίζουν τα σήματα PLC από το σύστημα PLC 1 να ζευγαρώσουν στο σύστημα PLC 2.

Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις του σχεδιασμού του συστήματος PLC είναι η παραλλαγή των παραμέτρων του καναλιού επικοινωνίας, όπως η απόκριση συχνότητας καναλιού, η χαρακτηριστική αντίσταση, οι απώλειες μετάδοσης και το επίπεδο ανθρωπογενούς θορύβου στη γραμμή ισχύος στις συχνότητες PLC. Αυτές οι παράμετροι καναλιού καθορίζουν το επίπεδο του σήματος PLC που απαιτείται για τη λήψη αξιόπιστων μεταδόσεων. Συνήθως τα κανάλια γραμμής ισχύος έχουν υψηλά και μεταβαλλόμενα επίπεδα θορύβου. Αυτός ο θόρυβος συχνά συγχρονίζεται με τη συχνότητα δικτύου. Για δίκτυα LV, αυτός ο θόρυβος παράγεται από ηλεκτρονικές συσκευές, μετατροπείς ισχύος, ηλεκτρικά εργαλεία και άλλες συσκευές. Για τα δίκτυα MT και HV οι κυριότερες πηγές θορύβου είναι

(α) θόρυβος κορώνας, ο οποίος είναι μια εκκένωση που προσομοιάζει με παρορμήσεις και λαμβάνει χώρα σε κάθε μισό κύκλο κύματος που ποικίλλει ανάλογα με τη στάθμη της σκόνης και της υγρασίας.

β) τον παλμικό θόρυβο που παράγεται από τη λειτουργία του διακλαδωτή.

γ) τόξο και φωτισμός, και

δ) μετατροπέας θορύβου που παράγεται από σταθμούς μετατροπής HVDC.

Μεγάλο μέρος αυτού του προκαλούμενου από τον άνθρωπο παλμικού θορύβου συγχρονίζεται με τη συχνότητα δικτύου και παράγει ένα φάσμα γραμμών με απόσταση συχνότητας δικτύου στις συχνότητες PLC. Οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος είναι επίσης μακρινές κεραίες σύρματος και οι ραδιοφωνικές μεταδόσεις μεγάλου και μέσου κύματος AM θα συζευχθούν στις γραμμές εάν χρησιμοποιηθεί ζεύξη φάσης προς γείωση. Υπάρχουν σημαντικές συνιστώσες συχνότητας από όλες αυτές τις πηγές θορύβου που εμφανίζονται στη ζώνη μετάδοσης σήματος του PLC. Ο θόρυβος στα κανάλια επικοινωνίας PLC είναι επομένως χρονικός μεταβαλλόμενος από τον άνθρωπο θόρυβο αντί του θερμικού θορύβου. Αυτά τα υψηλά και μεταβλητά επίπεδα θορύβου και παρεμβολής μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή μείωση του SNR και υποβάθμιση της συνολικής αξιοπιστίας του δικτύου, εάν το σύστημα δεν έχει σχεδιαστεί σωστά.

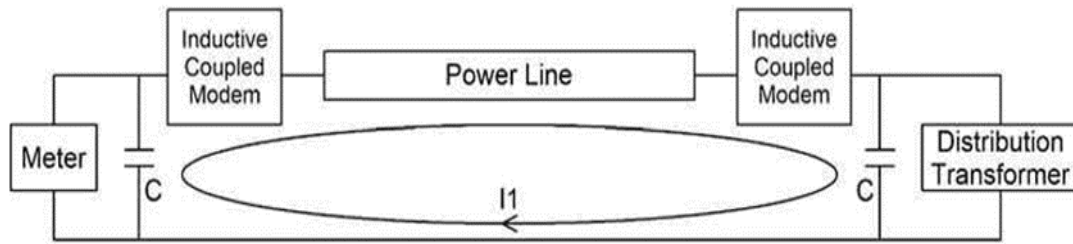
Επειδή οι γραμμές LV δεν μπορούν να τερματιστούν στη σωστή σύνθετη αντίσταση στις συχνότητες του PLC, εμφανίζονται ανακλάσεις από τα άκρα των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και τα πολλά φορτία κατά μήκος αυτών των γραμμών μεταφοράς, προκαλώντας βαθιές διατρήσεις σε ορισμένες συχνότητες. Οι γραμμές υψηλής τάσης είναι

συνήθως εναέριες γραμμές συναρμολογημένες σε πύργους και οι χαρακτηριστικές σύνθετες αντιστάσεις συμπεριφέρονται καλά και οι τυπικές τιμές είναι 400 Ω για ζεύξη φάσης προς γείωση και 600 Ω για ζεύξη φάσης προς φάση σε γραμμές απλών αγωγών και 300 Ω για φάση - γείωση και 500 Ω από φάση σε σύζευξη σε γραμμές αγωγών δέσμης [4]. Επειδή αυτές οι γραμμές είναι συνήθως αρκετές εκατοντάδες χιλιόμετρα, κάνουν επίσης καλές κεραίες, έτσι ώστε να αποφεύγεται η μετάδοση PLC σε συχνότητες που χρησιμοποιούνται από κοντινούς ραδιοφωνικούς σταθμούς AM. Τέτοιες παρεμβολές μεταξύ ραδιοφωνικών εκπομπών PLC και AM είναι πολύ λιγότερο πρόβλημα για τις γραμμές LV.

## 4.2 Σύζευξη LV

Στην Ευρώπη, ένα σύστημα Smart Grid [21] υλοποιείται κατά κύριο λόγο χρησιμοποιώντας το N-PLC. Αυτό θα επιτρέψει την πραγματοποίηση απομακρυσμένων αναγνώσεων μετρητών μέσω της προηγμένης υποδομής μετρητών (AMI) και θα επιτρέψει στους χρήστες ή στους προμηθευτές ηλεκτρικής ενέργειας να βελτιώσουν την αποδοτικότητα της προσφοράς και να μειώσουν το κόστος χάρη στον έξυπνο προγραμματισμό των απαιτήσεων ισχύος, όπως η καθυστέρηση στη χρήση πλυντηρίων πιάτων, φίλτρων πισίνας ή ηλεκτρικών αυτοκινήτων με χρέωση σε περιόδους χαμηλού κόστους ηλεκτρικής ενέργειας. Πολλές από αυτές τις επικοινωνίες PLC θα πραγματοποιηθούν στο δίκτυο LV. Στην Ευρώπη και σε πολλές άλλες χώρες η τροφοδοσία ρεύματος είναι γενικά 230 V και εκατό πελάτες μπορούν να τροφοδοτούνται από έναν μετασχηματιστή διανομής. Το δίκτυο N-PLC ή B-PLC μπορεί έτσι να καλύψει πολλά νοικοκυριά. Στις ΗΠΑ ο LV είναι 110 V και λόγω του υψηλότερου ρεύματος, κάθε μετασχηματιστής διανομής κανονικά εξυπηρετεί μερικά μόνο σπίτια, καθιστώντας το LV PLC λιγότερο εύκολο στην εφαρμογή από ό, τι στην Ευρώπη.

Οι σύνδεσμοι B-PLC είναι άμεσα διαθέσιμοι για να παρέχουν ένα LAN για πρόσβαση στο Διαδίκτυο σε διαφορετικά δωμάτια χρησιμοποιώντας την καλωδίωση της κεντρικής τροφοδοσίας σε ένα σπίτι [9]. Οι περισσότερες από αυτές τις μονάδες συμμορφώνονται με τις προδιαγραφές HomePlug Power Alliance [9] ή τη συμμαχία HD-PLC [22]. Και τα δύο αυτά συστήματα συμμορφώνονται με τα πρότυπα IEEE 1901 [23]. Σε αυτή την ενότητα όλες αυτές οι συσκευές θα ονομάζονται συσκευές γραμμής ισχύος, καθώς έτσι καλούνται από πολλούς κατασκευαστές. Αυτές οι εφαρμογές γραμμής ισχύος λειτουργούν



Σχήμα 4.3 Δύο επαγωγικά συζευγμένα μόντεμ που χρησιμοποιούνται σε ένα σύστημα PLC.

στη ζώνη συχνοτήτων 2-28 MHz. Είναι πιθανό ότι τα ψυγεία, τα πλυντήρια, τα κλιματιστικά, τα πλυντήρια πιάτων και άλλες οικιακές συσκευές θα συμπεριλάβουν τέτοιες συσκευές Power Line στο εγγύς μέλλον, ώστε να μπορέσουν να ενταχθούν σε ένα έξυπνο σύστημα ελέγχου αυτοματισμού στο σπίτι. Έτσι, οι συσκευές γραμμής ισχύος θα είναι το κυρίαρχο μόντεμ PLC στο εγγύς μέλλον. Δεδομένου ότι αυτές οι συσκευές είναι καταναλωτικές συσκευές, οι σύνδεσμοι PLC σε αυτές πρέπει να είναι χαμηλού κόστους, αξιόπιστοι και ασφαλείς.

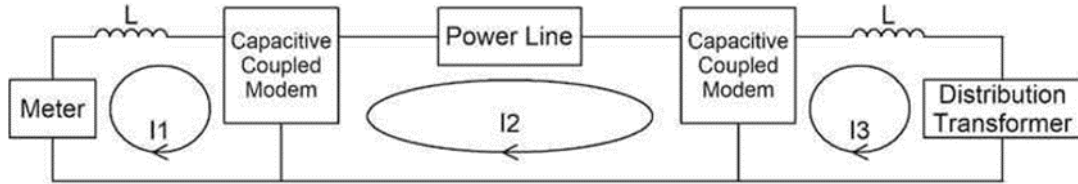
#### 4.3 Ζεύκτες N-PLC

Για τις εφαρμογές Smart Grid και AMI, τα G3-PLC [24] και PRIME PLC [25] λειτουργούν και οι δύο σε τμήμα της ζώνης συχνοτήτων CENELEC-A, η οποία προορίζεται αποκλειστικά για τους προμηθευτές ενέργειας. Η ζώνη συχνοτήτων από 35,9 kHz έως 90,6 kHz χρησιμοποιείται από το G3-PLC και το PRIME χρησιμοποιεί 41,992 kHz έως 88,867 kHz στην Ευρώπη. Το G3-PLC μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει τη ζώνη συχνοτήτων FCC 155 kHz έως 487 kHz.

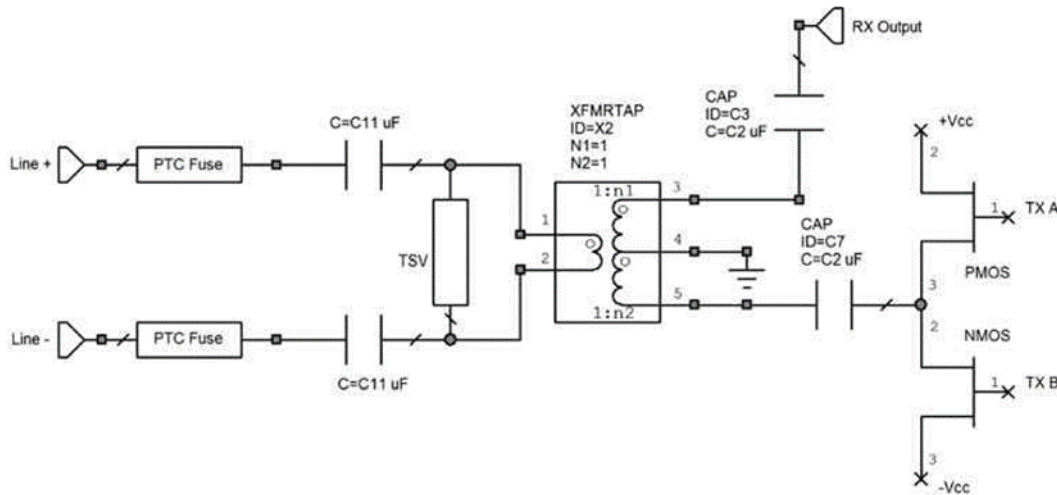
Το πλήρες εύρος ζώνης 35,9 kHz έως 487 kHz που χρησιμοποιείται από αυτά τα συστήματα υπερβαίνει τη μία δεκαετία, έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν κεντρικοί επαγωγικοί συζεύκτες. Οι κεντρικοί επαγωγικοί συζεύκτες μπορούν απλά να συσφιχθούν μέσω της γραμμής ισχύος, χωρίς να απαιτούνται πρόσθετες συνδέσεις. Ένας μετασχηματιστής ρεύματος εισάγει ένα ρεύμα PLC στη γραμμή ισχύος. Για να διασφαλιστεί ότι το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που συνδέεται στη γραμμή από τον πομπό του PLC απορροφάται από τον δέκτη PLC, αυτό το ρεύμα θα πρέπει να ρέει σχετικά απρόσκοπτα και η αντίσταση των φορτίων που συνδέονται στη γραμμή ισχύος στις συχνότητες PLC πρέπει να είναι μικρή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την ύπαρξη πυκνωτών σε όλη τη γραμμή ισχύος σε στρατηγικές θέσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3 Οι επαγωγικοί συζεύκτες είναι πολύ κατάλληλοι για τη στερέωση σε υπόγεια καλώδια κοντά σε μετασχηματιστές διανομής. Οι απαγωγείς υπερτάσεων που τοποθετούνται στους ακροδέκτες LV των μετασχηματιστών παρέχουν την απαιτούμενη

χωρητικότητα που φαίνεται στο σχήμα 4.1.

Οι χωρητικοί συζεύκτες είναι πολύ απλό να συνδεθούν στη γραμμή ισχύος, εφαρμόζουν τάση στην ηλεκτρική γραμμή. Εάν ένας χωρητικός συζεύκτης τοποθετηθεί δίπλα σε έναν μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας για μια εφαρμογή AMI, τότε ο χωρητικός συζεύκτης θα προκαλέσει ένα ρεύμα, το I1 να ρεύσει στο μετρητή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4, ένα ρεύμα I2 θα ρεύσει κατά μήκος της γραμμής ισχύος.



Σχήμα 4.4 Δύο χωρητικά συζευγμένα μόντεμ που χρησιμοποιούνται σε ένα σύστημα PLC



Σχήμα 4.5 Συζευγμένος συζεύκτης PLC με διατάξεις προστασίας και διαφορετικές αντιστάσεις εισόδου και εξόδου.

Για την καλή αποτελεσματικότητα σύζευξης, το I2 θα πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερο από την I1 ή το I3. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4, οι επαγωγείς μπορούν να τοποθετηθούν μεταξύ του χωρητικού συζευκτήρα και του μετρητή ή μεταξύ του χωρητικού συζεύκτη και του μετασχηματιστή διανομής για να εξασφαλιστεί ότι και τα I1 και I3 είναι μικρά.

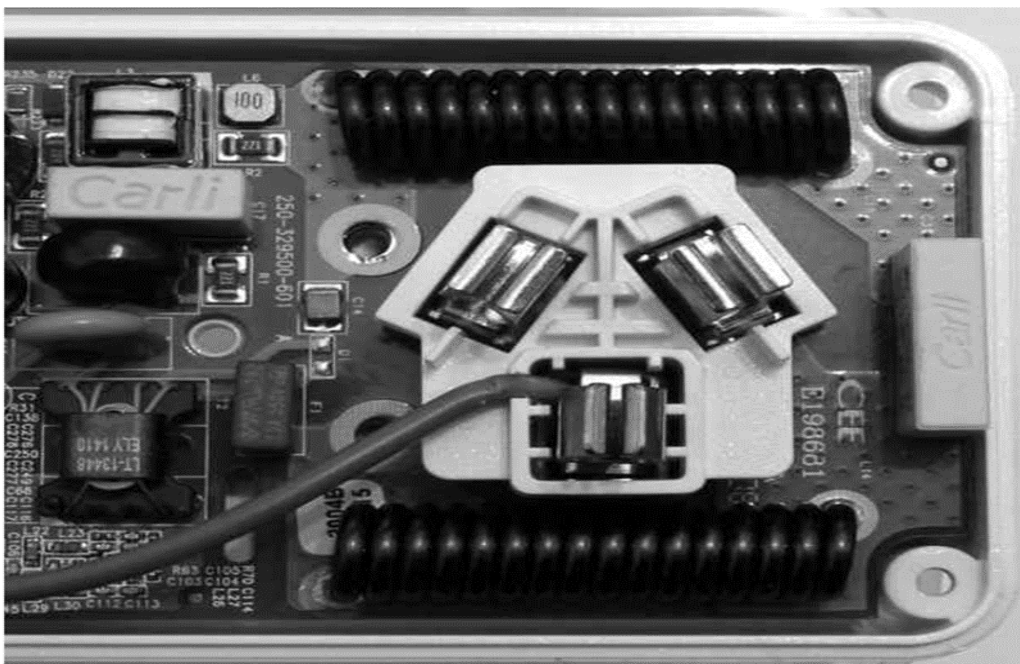
Το Σχήμα 4.5 δείχνει έναν τυπικό συζεύκτη PLC που χρησιμοποιείται για AMI. Η ασφάλεια του στοιχείου PTC είναι μια ασφάλεια θετικού συντελεστή θερμοκρασίας (PTC). Μια τέτοια ασφάλεια ανοίγει όταν η συσκευή γίνει πολύ ζεστή λόγω υπερβολικού ρεύματος, αλλά καθώς η συσκευή κρυώνει, επαναρυθμίζεται. Αυτές οι ασφάλειες παρέχουν προστασία αλλά δεν χρειάζεται να αντικαθίστανται κάθε φορά που παρουσιάζεται σφάλμα. Το στοιχείο TSV είναι μια συσκευή προσωρινής προστασίας τάσης, όπως μια συσκευή εκκένωσης αερίου ή δύο διόδους Zener από την κατάλληλη διαβάθμιση, έτσι ώστε να εκτελούν μόνο εάν ξεπεραστεί η κανονική τάση. Η προστασία μεταβατικής τάσης μαζί με την προστασία υπερέντασης που



παρέχεται από την ασφάλεια PTC διασφαλίζει ότι ο συζεύκτης PLC αντέχει προσωρινά σε συνθήκες υπερφόρτωσης. Μερικές φορές μια σύνδεση μόντεμ γίνεται σε σημείο ισχύος. Επειδή στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ οι έξοδοι ισχύος δεν είναι πολωμένες, με δύο ασφάλειες PTC και τους πυκνωτές C11 παρέχει επιπλέον απομόνωση και μειώνει την πιθανή τάση μεταξύ των πρωτογενών και δευτερογενών τυλιγμάτων του μετασχηματιστή απομόνωσης εάν η ενεργή και η ουδέτερη γραμμή ανταλλάσσονται. Στο Σχήμα 4.5, διαφορετικές δευτερεύουσες περιελίξεις και διαφορετικοί πυκνωτές χρησιμοποιούνται για να παρέχουν την διαφορετική αντιστοίχιση εμπέδησης για μετάδοση και λήψη. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα αποτελεσματική σύζευξη τόσο για τον πομπό όσο και για τον δέκτη. Για εφαρμογές όπου είναι βέβαιο ποια γραμμή είναι η ενεργή γραμμή και ποια γραμμή είναι ουδέτερη, ορισμένα κόστη μπορούν να αποθηκευτούν χρησιμοποιώντας έναν πυκνωτή και μία ασφάλεια PTC. Στην πράξη [26] χρησιμοποιούνται πιο πολύπλοκα δίκτυα φιλτραρίσματος ζώνης αντί των πυκνωτών C2 και C3 στο Σχήμα 4.5.

### 4.3 Ζεύκτες B-PLC

Οι περισσότεροι συζευκτήρες B-PLC χρησιμοποιούνται για εφαρμογές γραμμής ισχύος και η τυπική συχνότητα λειτουργίας είναι 2-28 MHz. Αυτές οι συσκευές περιλαμβάνουν ένα μόντεμ B-PLC και ένα υλικό LAN για να επιτρέψουν τη χρήση του



Σχήμα 4.6 Επαγωγείς που χρησιμοποιούνται στον συζεύκτη ηλεκτρικής γραμμής [27].

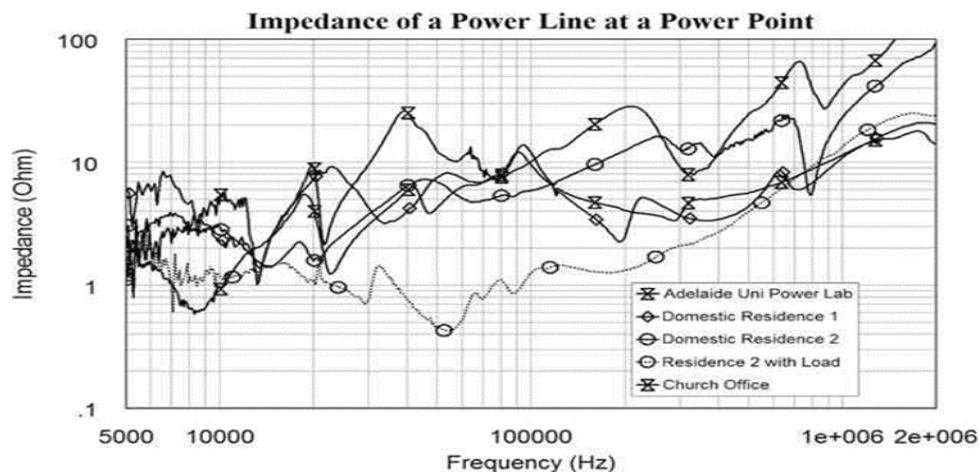
η συσκευή να είναι ένας διανομέας WiFi ή να επιτρέπεται η πραγματοποίηση συνδέσεων μέσω δικτύου LAN σε υπολογιστές, συσκευές τηλεόρασης ή άλλες συσκευές. Δεδομένου ότι αυτοί οι συζεύκτες LAN συνδέονται κανονικά σε δύο ή περισσότερα διαφορετικά σημεία ισχύος, ισχύει το διάγραμμα συνιστωσών του Σχήματος 4.4. Εάν ο συζευκτης γραμμής ισχύος

δεν περιλαμβάνει πρίζα, τότε τα ρεύματα I1 και I2 στο Σχήμα 4.4 είναι μηδέν και οι επαφές που φαίνονται δεν απαιτούνται. Εάν το μόντεμ της γραμμής ρεύματος περιλαμβάνει πρίζα εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω της πρίζας, έτσι ώστε να μπορεί να συνδεθεί και μια ηλεκτρική συσκευή, τότε πρέπει να συμπεριληφθούν οι επαγωγείς ανάμεσα στην πρίζα εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω της πρίζας και του ζεύκτη PLC, για να διασφαλιστεί ότι τα I1 και I3 ελαχιστοποιούνται. Σχήμα 4.6, δείχνει αυτούς τους επαγωγείς, την ασφάλεια PTC, τους πυκνωτές και τον μετασχηματιστή που χρησιμοποιούνται για έναν τυπικό συζεύκτη PLC [27]. Τα ποσοστά δεδομένων 600 Mbps μπορούν εύκολα να επιτευχθούν στις κανονικές καλωδιώσεις κατοικιών.

Οι συζεύκτες PLC για εφαρμογές γραμμής ισχύος είναι συνήθως χωρητικοί συζεύκτες παρόμοιοι με αυτούς που φαίνονται στο σχήμα 4.5, αλλά σχεδιάζονται για την περιοχή συχνοτήτων 2-28 MHz. Διαφορετικές αντιστάσεις μετάδοσης και λήψης ενσωματώνονται έχοντας πολλαπλές δευτερεύουσες περιελίξεις στον μετασχηματιστή απομόνωσης συνδεδεμένο σε διαφορετικά δίκτυα φίλτρων.

#### 4.4 Αντιστοιχία εμπέδησης

Για τον ακριβή σχεδιασμό ζευκτών, πρέπει να είναι γνωστή η σύνθετη αντίσταση συχνοτήτων PLC των γραμμών LV στις οποίες τοποθετούνται οι συζεύκτες. Η σύνθετη αντίσταση γραμμής ισχύος PLC ποικίλλει με τον χρόνο



Σχήμα 4.7 Μετρούμενες αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ως N-PLC

δεδομένου ότι τα διαφορετικά φορτία συνδέονται με το δίκτυο και επίσης εξαρτώνται από το μήκος της γραμμής ισχύος και των κλάδων της. Δεν δημοσιεύονται πολλές μετρήσεις σύνθετης αντίστασης γραμμής ρεύματος. Μία από τις δυσκολίες είναι ότι αυτές οι σύνθετες

αντιστάσεις πρέπει να είναι ακριβείς και να εκτελούνται ενώ το δίκτυο τροφοδοτείται. Οι Cavdar [2] και Kim [3] δείχνουν έναν πυκνωτή που χρησιμοποιείται για την απομόνωση της συχνότητας δικτύου, αλλά δεν δείχνουν πώς αυτός ο πυκνωτής επηρεάζει τη μέτρησή τους ή την ακρίβεια των μετρήσεων τους. Ο Cavdar ανέφερε μετρήσεις αντίστασης στην Ευρώπη μεταξύ 1 Ω και 20 Ω για τις συχνότητες N-PLC. Ο Kim ανακοίνωσε μετρήσεις στην περιοχή συχνοτήτων 1-30 MHz και έδειξε τιμές αντίστασης από περίπου 5 Ω και 220 Ω. Το PRIME Alliance TWG [25] πραγματοποιεί μετρήσεις σύνθετης αντίστασης σε διάφορα σημεία του ισπανικού ηλεκτρικού δικτύου Lu [28], παρουσιάζει τις αντιστάσεις LV που μετρώνται σε διάφορους ισπανικούς υποσταθμούς, οι αντιστάσεις κυμαίνονται από 0,1 Ω έως 1,5 Ω, ωστόσο λεπτομέρειες του συστήματος μέτρησης δεν παρέχονται. Το Σχήμα 4.4 δείχνει ότι χωρίς τους επαγωγείς απομόνωσης L, η αντίσταση της γραμμής ισχύος παράλληλα με τον μετασχηματιστή διανομής θα παρατηρηθεί από το μόντεμ σωστής χωρητικής ζεύξης. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με αυτά του Cavdar, φαίνεται ότι η μετρημένη αντίσταση είναι αυτή των μετασχηματιστών. Χρησιμοποιώντας επαγωγείς απομόνωσης L επιτρέπεται η εκτέλεση μετρήσεων σύνθετης αντίστασης μόνο στη γραμμή ισχύος ή μόνο στο μετασχηματιστή διανομής. Το Σχήμα 4.7 δείχνει μερικές μετρήσεις σύνθετης αντίστασης γραμμής ηλεκτρικής τάσης που έγιναν από την Kikkert από 5 kHz έως 2 MHz, χρησιμοποιώντας έναν αναλυτή σύνθετης αντίστασης επαγωγής [29]. Οι μετρήσεις σταθερής γραμμής έγιναν σε σημεία ισχύος χωρίς να συνδεθεί κάποιος εξοπλισμός σε άλλα σημεία ισχύος κοντά. Η διακεκομμένη καμπύλη δείχνει τη μέτρηση της σύνθετης αντίστασης όταν συνδέεται τυπικός εξοπλισμός γραφείου με το ίδιο σημείο ισχύος. Το Σχήμα 4.6 δείχνει ότι η σύνθετη αντίσταση του εξοπλισμού γραφείου κυριαρχεί στη ζώνη συχνοτήτων N-PLC. Η μετρηθείσα σύνθετη αντίσταση είναι πολύ χαμηλότερη από τη χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση της γραμμής ισχύος, επειδή υπάρχουν πολλές συσκευές που συνδέονται παράλληλα σε όλη τη γραμμή ισχύος σε κάθε σπίτι, εργοστάσιο ή γραφείο. Αυτές οι μετρήσεις από τα Cavdar, Lu και Kikkert και τα διαγράμματα μπλοκ στις Εικόνες 4.3 και 4.4, δείχνουν ότι λόγω του πολύ χαμηλού μετασχηματιστή και αντιστάσεις του εξοπλισμού, οι επαγωγικοί συζευκτές θα συζεύξουν πολύ περισσότερη ισχύ σήματος PLC στη γραμμή ισχύος από ότι οι χωρητικοί συζευκτές, εκτός εάν χρησιμοποιούνται επαγωγικοί διακόπτες L.

Οι σύνθετες αντιστάσεις B-PLC είναι γενικά υψηλότερες από τις αντιστάσεις N-PLC και ποικίλλουν ταχύτερα στη ζώνη συχνοτήτων, δεδομένου ότι στις συχνότητες B-PLC πολλές γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος πλησιάζουν το ένα τέταρτο του μήκους κύματος και αντικατοπτρίζουν ένα ανοικτό κύκλωμα στο τέλος αυτής της γραμμής ως βραχυκύκλωμα στο άλλο άκρο. Δεδομένου ότι οι σύνθετες αντιστάσεις των συσκευών για συστήματα 110 V LV είναι το ένα τέταρτο εκείνων των συστημάτων 220 V, οι σύνθετες αντιστάσεις στις συχνότητες

PLC θα είναι επίσης μικρότερες για τα συστήματα 110 V από ό, τι για τα συστήματα 220 V. Επειδή τα συνδεδεμένα φορτία, και συνεπώς η σύνθετη αντίσταση γραμμής, είναι χρονικά μεταβαλλόμενα, είναι δύσκολο να έχουμε μια ακριβή αντιστοίχιση εμπέδησης για τον συζεύκτη PLC. Ωστόσο, τα σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας συχνότητας PLC έχουν επαρκές ύψος απόδοσης που επιτυγχάνει την επικοινωνία με χαμηλά σφάλματα, ακόμη και με σημαντικές αναντιστοιχίες της σύνθετης αντίστασης. Η επιλογή σύνθετης αντίστασης γραμμής μπορεί επίσης να ενσωματωθεί στα σχέδια συζεύκτη PLC για να ξεπεραστούν αυτές οι παραλλαγές σύνθετης αντίστασης.

#### 4.5 Σύζευξη φάσης προς φάση

Σε ορισμένες χώρες ή σε άλλες εφαρμογές, όπως ο φωτισμός δρόμου, δεν υπάρχει ουδέτερο ή γειωμένο καλώδιο για συνδέσεις γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση, απαιτείται σύνδεση ζεύξης φάσης για να συνδέσετε το μόντεμ PLC προς ή από τη γραμμή ισχύος. Το κύκλωμα για τη σύζευξη φάσης προς φάση είναι το ίδιο όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5, αλλά το Line + συνδέεται σε μία ενεργή φάση και ο ακροδέκτης γραμμής συνδέεται με την άλλη ενεργή φάση. Σε αυτή την περίπτωση, δύο πυκνωτές C11 όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5 χρησιμοποιούνται για να μειώσουν την τάση τάσης μεταξύ του πρωτεύοντος και των δευτερευόντων του μετασχηματιστή απομόνωσης.

#### 4.6 Σύζευξη μονής φάσης

Τα περισσότερα σπίτια σε χώρες 220 V και πολλές σε χώρες 110 V έχουν παροχή μίας φάσης. Ως αποτέλεσμα, οποιαδήποτε κατανομή PLC μέσω του δικτύου LV πρέπει να διανέμεται έτσι ώστε τα σήματα PLC να εκτελούνται και στις τρεις φάσεις παροχής. Έχοντας τρεις πανομοιότυπους συνδέσμους PLC με την ίδια σύνδεση μόντεμ, μπορεί να τροφοδοτήσει και τις τρεις φάσεις από μία πηγή δεδομένων. Για να είναι δυνατή η σύζευξη φάσης προς φάση για οποιαδήποτε από τις τρεις φάσεις, είναι δυνατή η παραγωγή των τριών σημάτων PLC με διαφορά φάσης 120 μοιρών μεταξύ κάθε γραμμής ισχύος, όπως ακριβώς και η παροχή τροφοδοσίας. Εναλλακτικά, εάν η κατανομή PLC προέρχεται από μία φάση της τροφοδοσίας MV, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας συζεύκτης παράκαμψης τριών φάσεων .

## 4.8 Αναφορές

1. C. J. Kikkert, Calculating radiation from power lines for power line communications, in *Matlab for Engineers – Applications in Control, Electrical Engineering, IT and Robotics*, K. Perutka, Ed. InTech, 2011, ch. 9, 221–246.
2. I. H. Cavdar and E. Karadeniz, Measurements of impedance and attenuation at CENELEC bands for power line communications systems, *Sensors*, 8(12), 8027–8036, Dec. 2008.
3. Y.-S. Kim and J.-C. Kim, Characteristic impedances in low-voltage distribution systems for power line communication, *J. Electr. Eng. Technol.*, 2(1), 29–34, Jan. 2007.
4. Planning of (single-sideband) power line carrier systems, *International Electrotechnical Commission (IEC)*, Geneva, Switzerland, Technical Report CEI/IEC 663: 1980, 1980.
5. A. I. Zverev, *Handbook of Filter Synthesis*. John Wiley & Sons, Chichester 1967.
6. L. P. Huelsman, *Active and Passive Analog Filter Design: An Introduction*. McGraw-Hill International Editions, 1993.
7. Butterworth filter, 2013. [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Butterworth\\_filter](http://en.wikipedia.org/wiki/Butterworth_filter)
8. Premo, products, PLC, PLC Accessories, MICU 300A-S/LF, Premo Smart Grid, 2013. [Online]. Available: <http://www.grupopremo.com/in/product/254/features/plc/plcaccessories/micu300amediumvoltageinductivecouplingunits300a.html>
9. Resources and white papers, HomePlug Alliance, 2014. [Online]. Available: <http://www.homeplug.org/tech-resources/resources/>
10. *Harmonic Current Emissions: Guidelines to the Standard EN 61000-3-2ID*, European Power Supply Manufacturers Association, Nov. 2010. [Online]. Available: [http://www.epsma.org/PFC\\_Guide\\_November\\_2010.pdf](http://www.epsma.org/PFC_Guide_November_2010.pdf)
11. C. J. Kikkert, *RF Electronics: Design and Simulation*. James Cook University, Townsville, Queensland, Australia, 2013.
12. *MCD80 — Power Line Carrier Coupling Devices*, ABB Switzerland Ltd., Mar. 2011, brochure. [Online]. Available: <http://new.abb.com/network-management/communication-networks/power-line-carriers/mcd80>
13. NI-AWR design environment, Microwave Office, National Instruments-AWR. [Online]. Available: <http://www.awrcorp.com/products/microwave-office>
14. PLC/BPL couplers for MV, Artech, 2014. [Online]. Available: <http://www.artech.com/en/products-and-solutions/category/plc-bpl-couplers-for-mv>
15. Inductive coupler for PLC, Mattron, 2014. [Online]. Available: <http://www.mattrone.com/eng2/product/productic.html>
16. K. Razazian, M. Umari, A. Kamalizad, V. Loginov, and M. Navid, G3-PLC specification for powerline communication: Overview, system simulation and field trial results, in *Proc. IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Rio de Janeiro, Brazil, Mar. 28–31, 2010, 313–318.
17. C. J. Kikkert, MV to LV transformer PLC bypass coupling networks for a low cost smart grid rollouts, in *Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technol. Asia*, Perth, Australia, Nov. 13–16, 2011, 1–6.
18. —, Power transformer modelling and MV PLC coupling networks, in *Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technol. Asia*, Perth, Australia, Nov. 13–16, 2011, 1–6.
19. —, A PLC frequency model of 3 phase power distribution transformers, in *Proc. IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun.*, Tainan, Taiwan, Nov. 5–8, 2012, 205–210.
20. —, Effect of couplers and line branches on PLC communication channel response, in *Proc. IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun.*, Brussels, Belgium, Oct. 17–20, 2011, 309–314.
21. Roadmap 2010-18 and detailed implementation plan 2010-12, The European Electricity Grid Initiative, May 2010. [Online]. Available: [http://www.smartgrids.eu/documents/EEGI/EEGI\\_Implementation\\_plan\\_May\\_2010.pdf](http://www.smartgrids.eu/documents/EEGI/EEGI_Implementation_plan_May_2010.pdf)
22. What's HD-PLC? HD-PLC Alliance, 2014. [Online]. Available: <http://www.hd-plc.org/modules/about/hdplc.html>
23. IEEE standard for broadband over power line networks: Medium access control and physical layer specifications, IEEE Standards Association, IEEE Standard 1901-2010, Sep. 2010. [Online]. Available: <http://grouper.ieee.org/groups/1901/>
24. Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for G3-PLC networks, ITU-T, Recommendation G.9903, May 2013. [Online]. Available: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9903>
25. Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for PRIME networks, ITU-T, Recommendation G.9904, Oct. 2012. [Online]. Available: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9904>

201210-I/en

26. PRIME-based PLC solutions, ATPL230A, Atmel, 2014. [Online]. Available: <http://www.atmel.com/devices/ATPL230A.aspx>
27. 600Mbps powerline kit with Gigabit Ethernet – NP507, NetCommWireless. [Online]. Available: <http://www.netcommwireless.com/product/powerline/np507>
28. X. Lu, I. H. Kim, and R. Vedantham, Implementing PRIME for robust and reliable power line communication (PLC), Texas Instruments, White paper, Jul. 2013. [Online]. Available: <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?baseLiteratureNumber=SLYY038>
29. S. Zhu, C. J. Kikkert, and N. Ertugrul, A wide bandwidth, online impedance measurement method for power systems, based on PLC techniques, in *IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, Melbourne, Australia, Jun. 1–5, 2014, 1167–1170.

## Κεφάλαιο 5 : PLC Για Αυτοματισμό Σπιτιού & Βιομηχανίας

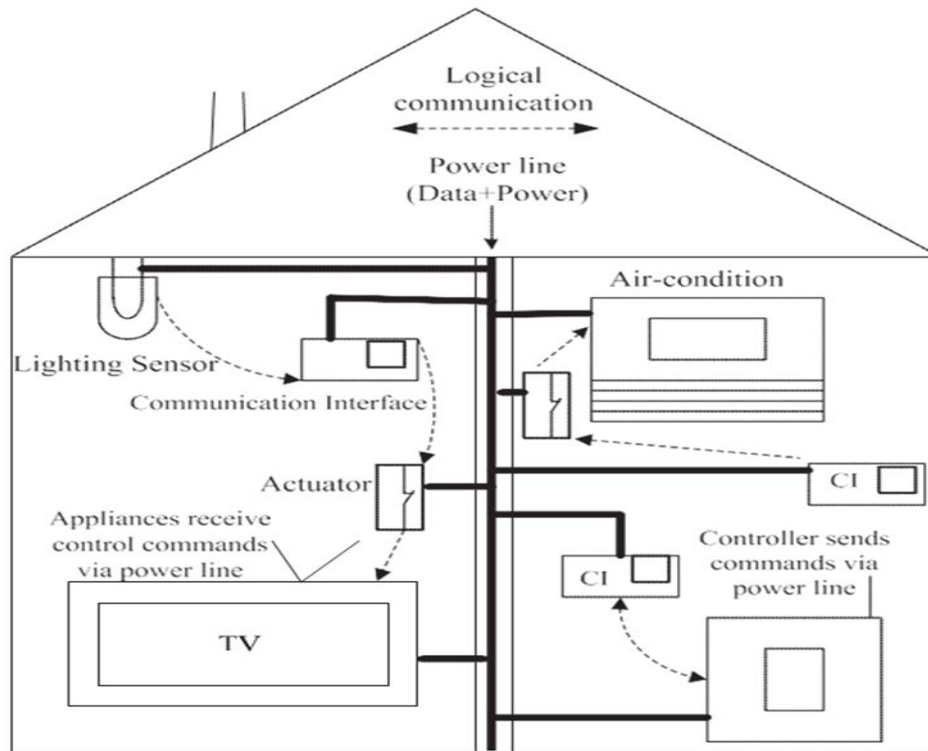
### 5.1 Εισαγωγή

Το χαμηλό κόστος μέσων για την τεχνολογία επικοινωνίας γραμμής ισχύος (PLC) το καθιστά κατάλληλο για οικιακούς και βιομηχανικούς σκοπούς αυτοματοποίησης. Το PLC χρησιμοποιεί ήδη υπάρχουσα υποδομή σε κάθε οικιακή και βιομηχανική εγκατάσταση, η οποία εξαλείφει την περιττή δαπάνη και τις δυσκολίες εγκατάστασης νέων συρμάτων για την επίτευξη υψηλής διεύθυνσης σήματος. Αυτό επιτρέπει τη χρήση τύπου plug and play συστημάτων PLC. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια επισκόπηση των συστημάτων αυτοματισμού οικιακών και βιομηχανικών συστημάτων PLC με ενδιαφέροντα παραδείγματα εφαρμογών.

### 5.2 Αυτοματισμοί οικιακής και βιομηχανικής χρήσης με PLC

Η αυτοματοποίηση του σπιτιού και της βιομηχανίας είναι ένα βασικό κομμάτι της σύγχρονης ζωής που βοηθά στον έλεγχο και την παρακολούθηση της μεγάλης ποικιλίας οικιακών και βιομηχανικών συσκευών, όπως συστήματα κλιματισμού, ψύξης ή φωτισμού. Εκτός από τη λειτουργικότητα και την άνεση που παρέχουν αυτά τα συστήματα, συμβάλλουν επίσης στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των συσκευών και άλλων ηλεκτρικών συσκευών. Η ταχεία ανάπτυξη των τεχνολογιών επικοινωνίας ώθησε την ενσωμάτωση των συστημάτων αυτοματισμού σε κυβερνο-φυσικά δίκτυα, γεγονός που επιτρέπει την εξ αποστάσεως διαχείριση αυτών των συστημάτων, αλλά από την άλλη απαιτεί βελτιωμένα μέτρα για την εξασφάλιση της ασφάλειας και της ιδιωτικής ζωής.

Το PLC παρέχει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων επικοινωνίας και τα συστήματα ταξινομούνται ευρέως σε δύο κατηγορίες. Το Narrowband PLC χρησιμοποιείται κυρίως για αυτοματοποίηση με μια γενική έννοια και το ευρυζωνικό PLC επιτρέπει εφαρμογές οικιακής δικτύωσης (πολυμέσων). Ένας μεγάλος αριθμός λύσεων αυτοματισμού οικιακών και βιομηχανικών εφαρμογών που βασίζονται σε PLC είναι τώρα διαθέσιμοι [1].



Σχήμα 5.1 Εικόνα οικιακού αυτοματισμού με βάση το PLC.

Το σχήμα 5.1 απεικονίζει τη σύνδεση συσκευών, αισθητήρων και ελεγκτών μέσω γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος σε ρύθμιση αυτοματισμού σπιτιού. Αισθητήρες όπως αισθητήρες φωτός, θερμοκρασίας και καπνού αναπτύσσονται σε κάθε δωμάτιο σύγχρονου σπιτιού και τα σήματα τους αποστέλλονται μέσω μιας διεπαφής επικοινωνίας όπως Ethernet, RS232 κλπ. Στη μονάδα ελέγχου, η οποία είναι μια κεντρική μονάδα σε ένα σύστημα αυτοματισμού στο σπίτι που καταγράφει δεδομένα και καθορίζει τις απαιτούμενες εντολές και τους στέλνει στον ενεργοποιητή και τους ρυθμιστές για να ενεργοποιούν και να απενεργοποιούν τις συσκευές. Συσκευές όπως οι μονάδες κλιματισμού με θερμοστάτη και πλυντήρια είναι επίσης απευθείας συνδεδεμένες με τους ενεργοποιητές και απενεργοποιούνται σύμφωνα με τις ειδοποιήσεις απόκρισης ζήτησης από τη διεπαφή επικοινωνίας κατά τους χρόνους αιχμής και αποκόπτονται από την πλακέτα ισχύος όταν δεν χρησιμοποιούνται. Οι κεντρικές μονάδες ελέγχου παρέχουν συνήθως ένα φιλικό γραφικό περιβάλλον χρήστη (GUI) για τους τελικούς χρήστες με οθόνη και πληκτρολόγιο για τη διαχείριση του συστήματος. Οι αισθητήρες, οι μονάδες ελέγχου, οι συσκευές και οι ενεργοποιητές συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός καναλιού επικοινωνίας, το οποίο στην περίπτωση του PLC είναι οι υπάρχουσες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Πριν από τις πρόσφατες τυποποιήσεις στενής ζώνης PLC, όπως το IEEE 1901.2 και το ITU-T G.990x, μόνο σχετικά λίγες εταιρείες ανέπτυξαν και παρείχαν μάρκες μόντεμ ηλεκτρικού ρεύματος και ένας περιορισμένος αριθμός εφαρμογών έφθασε σε ποσότητες που επέτρεψαν την



ανάπτυξη ατομικών συνόλων chip. Τα συστήματα X10, KNX PL 110 και LONWorks είναι αρκετά αντιπροσωπευτικά των χρησιμοποιούμενων φυσικών τεχνολογιών (PHY). Επιπλέον, σε αυτό το κεφάλαιο θα συζητηθούν τρία άλλα συστήματα, τα οποία είναι ελάχιστα γνωστά στην επιστημονική κοινότητα. Το πρώτο είναι ένα πρότυπο ISO για PLC σε πλοία μεταφοράς ψυκτικών δοχείων, το οποίο υλοποιεί δύο στρώματα PHY με διαχωρισμό συχνοτήτων για ταυτόχρονη χρήση των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το δεύτερο σύστημα βασίζεται σε μια δημοσιευμένη προδιαγραφή ενός ιδιόκτητου έξυπνου συστήματος μέτρησης, το οποίο χρησιμοποιείται ήδη από επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας. Η επιλεγμένη προσέγγιση για την ίδια εφαρμογή είναι εντελώς διαφορετική από την IEEE 1901.2 ή ITU-T G.990x. Το τρίτο σύστημα χρησιμοποιεί ένα επίπεδο PHY που επιτρέπει πολύ μικρούς διαμορφωτές μόντεμ χωρίς έναν πυκνωτή ζεύξης ή μετασχηματιστή. Μια σύντομη επισκόπηση αυτών των συστημάτων PLC για οικιακή και βιομηχανική αυτοματοποίηση παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.1.

### 5.3 Δημοφιλή πρωτόκολλα αυτοματισμού σπιτιών

Πολλά δημοφιλή πρωτόκολλα συστήματος αυτοματισμού κατοικιών και κτιρίων έχουν αναπτυχθεί πριν από λίγο καιρό. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια σύντομη επισκόπηση σημαντικών πρωτοκόλλων.

#### 5.3.1 Πρωτόκολλο X10

Το X10 είναι ένα πρωτόκολλο PLC στενής ζώνης για την επικοινωνία μεταξύ ηλεκτρονικού εξοπλισμού για οικιακό αυτοματισμό. Το πρωτόκολλο X10 παρέχει σήματα μεταξύ πομπών και δεκτών πάνω από την ηλεκτρική καλωδίωση του σπιτιού.

Protocol	Rate (bit/sec)	Frequency Band (kHz)	Modulation Scheme
X10	60	95–125	Short 120 kHz pulses
KNX	1200	110	BFSK
LONWorks	5400/3600	132/86	BPSK
ISO 10368:2006(E)	1200/134400	53.9–56.1/130–400	FSK/BPSK
AMIS CX1-Profile	600–3000	39–90	DPSK
digitalSTROM	n.a.	10–120	Current on/off switching

Πίνακας 5. 1 Επισκόπηση των προτύπων PLC οικιακού και βιομηχανικού αυτοματισμού

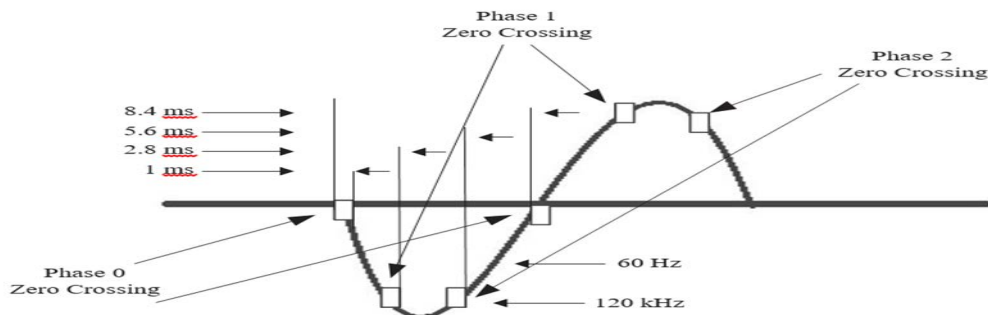
Αυτά τα σήματα είναι μικρές ραδιοσυχνότητες (RF) που εκπέμπουν τις μεταδιδόμενες πληροφορίες και ελέγχουν τις ηλεκτρικές συσκευές, όπως τα συστήματα φωτισμού και τον εξοπλισμό ήχου / εικόνας. Το X10 αναπτύχθηκε το 1975 από την Pico Electronics της

Glenrothes της Σκωτίας και είναι επίσης γνωστό ως τεχνολογία δικτύου domotics. Παραμένει η πιο δημοφιλής τεχνολογία που διατίθεται για οικιακά συστήματα αυτοματισμού λόγω των εκατομμυρίων εγκατεστημένων μονάδων παγκοσμίως και της χαμηλής τιμής των νέων μονάδων.

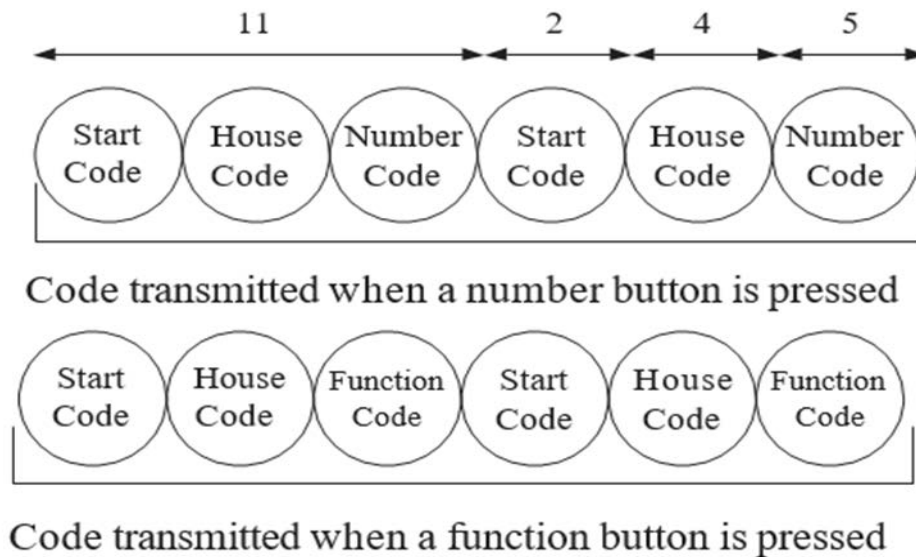
### 5.3.1.1 Προδιαγραφή και μετάδοση φυσικού επιπέδου X10

Οι μεταδόσεις X10 συγχρονίζονται με το σημείο διέλευσης μηδενός της γραμμής εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι εκρήξεις μετάδοσης θα πρέπει να γίνονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο σημείο διασταύρωσης του μηδενός από το αρνητικό στο θετικό σήμα ισχύος, μέσα σε 200 μικροδευτερόλεπτα του μηδενικού σημείου διέλευσης. Οι εκρήξεις είναι σήματα 120 kHz διάρκειας 1 ms. Η παρουσία μιας έκρηξης αντιπροσωπεύει ένα '1', ενώ η απουσία μιας έκρηξης σημαίνει '0'. Εκτός από τον κώδικα έναρξης (βλ. Παρακάτω), οι δυαδικές πληροφορίες κωδικοποιούνται σε ζεύγη ριπών. Αυτό σημαίνει ότι ένα δυαδικό '1' μεταδίδεται ως παρουσία ενός παλμού στον μισό κύκλο που ακολουθείται από κανένα παλμό στον επόμενο μισό κύκλο. Μια δυαδική '0' μεταδίδεται ως απουσία παλμού, αμέσως ακολουθούμενη από την παρουσία παλμού. Στα συστήματα τριών φάσεων, η έκρηξη αποστέλλεται τρεις φορές, για να φτάσει στο μηδενικό σημείο διέλευσης κάθε φάσης. Το σχήμα 5.2 δείχνει το χρονοδιάγραμμα των σημάτων X10 σε σύστημα 60 Hz. Ο χρονοδιάγραμμα του σήματος στις διασταυρώσεις μηδενισμού απλοποιεί τους δέκτες, διαβάζοντας μόνο από τη γραμμή ισχύος για μικρό χρονικό διάστημα αφού ανιχνεύσει ένα μηδενικό σημείο διέλευσης. Δεδομένου ότι το σύστημα μεταδίδει μόνο ένα bit ανά κύκλο του φορέα, ο ακαθάριστος ρυθμός δυαδικών σημάτων του συστήματος X10 είναι 60 bps [2].

Μια πλήρης μετάδοση κώδικα περιλαμβάνει έντεκα κύκλους της γραμμής ισχύος. Οι πρώτοι δύο κύκλοι αντιπροσωπεύουν έναν κωδικό έναρξης. Οι επόμενοι τέσσερις κύκλοι αντιπροσωπεύουν τον κωδικό κατοικίας και οι τελευταίοι πέντε κύκλοι αντιπροσωπεύουν είτε τον κωδικό αριθμού (1 έως 16) είτε έναν κωδικό λειτουργίας (ενεργοποιημένο, απενεργοποιημένο, κλπ.).



Σχήμα 5.2 Χρονοδιάγραμμα μετάδοσης X10.



Σχήμα 5.3 Κωδικοποίηση και μετάδοση X10. Οι αριθμοί είναι κύριοι κύκλοι.

Αυτό το πλήρες μπλοκ (κωδικός εκκίνησης, κωδικός σπιτιού, κωδικός κλειδιού) θα πρέπει πάντα να μεταδίδεται σε ομάδες 2 με 3 κύκλους ηλεκτρικών γραμμών μεταξύ κάθε ομάδας 2 κωδικών, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3.

#### 5.4 Περιορισμοί X10

Το πιο συνηθισμένο πρόβλημα του X10 είναι η μεγάλη εξασθένηση των σημάτων μεταξύ των δύο ζωνών αγωγών στο σύστημα τριών συρμάτων 120/240 volt που χρησιμοποιείται στη Βόρεια Αμερική λόγω της υψηλής σύνθετης αντίστασης της περιέλιξης του μετασχηματιστή διανομής μεταξύ των ζωντανών αγωγών. Αυτό το πρόβλημα θα μπορούσε να ξεπεραστεί εγκαθιστώντας έναν πυκνωτή ανάμεσα στα σύρματα των ποδιών ως διαδρομή για τα σήματα X10. Επιπλέον, για τη σύνδεση γείωσης χρησιμοποιείται ένα γυμνό μη μονωμένο σύρμα. Εάν ο αποστολέας είναι συνδεδεμένος στη φάση 1 και ο δέκτης είναι συνδεδεμένος στη φάση 2, το σήμα θα ήταν μερικές φορές τόσο κακή ώστε οι μονάδες X10 θα αντιδρούσαν με διαλείψεις Το πρωτόκολλο X10 είναι επίσης αργό και απαιτεί τρία τέταρτα του δευτερολέπτου για τη μετάδοση μιας ηλεκτρονικής διεύθυνσης συσκευής και μιας εντολής.

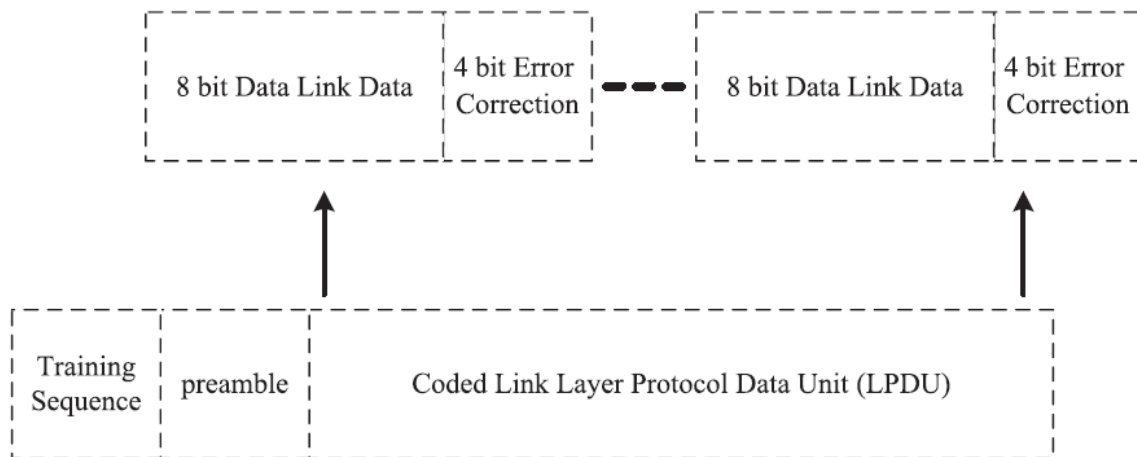
#### 5.5 Πρότυπο KNX / EIB PL 110 Standard

Το KNX / EIB είναι ένα ανοιχτό πρότυπο που χρησιμοποιείται στα συστήματα διαύλου αυτοματισμού κατοικιών και κτιρίων. Το πρότυπο βασίζεται στο πρωτόκολλο επικοινωνίας δικτύου OSI της EIB αλλά τροποποιείται με τις φυσικές στρώσεις, τους τρόπους διαμόρφωσης και την εμπειρία χρήσης των BatiBUS και των Ευρωπαϊκών Οικιακών Συστημάτων (EHS). Είναι βελτιστοποιημένο για εφαρμογές ελέγχου χαμηλής ταχύτητας όπως συστήματα φωτισμού.

Το KNX / EIB καθορίζεται σε διάφορα φυσικά μέσα, συμπεριλαμβανομένης της γραμμής ρεύματος (KNX PL 110), του συνεστραμμένου ζεύγους, του ραδιοφώνου, του υπερύθρου και του Ethernet και έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι ανεξάρτητο από οποιαδήποτε συγκεκριμένη πλατφόρμα υλικού [3].

### 5.6 Προδιαγραφή Layer Physical Data and Data Layer KNX PL 110

Το πρότυπο KNX παρέχει τη δυνατότητα στους προγραμματιστές να επιλέξουν μεταξύ πολλών φυσικών στρωμάτων ή να τα συνδυάσουν. Το KNX PL 110 επιτρέπει επικοινωνία μέσω των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά επικοινωνίας είναι η εξάπλωση σηματοδοσίας πλήκτρων μετατόπισης συχνότητας (FSK), η ασύγχρονη μετάδοση πακέτων δεδομένων και η αμφίδρομη αμφίδρομη επικοινωνία.

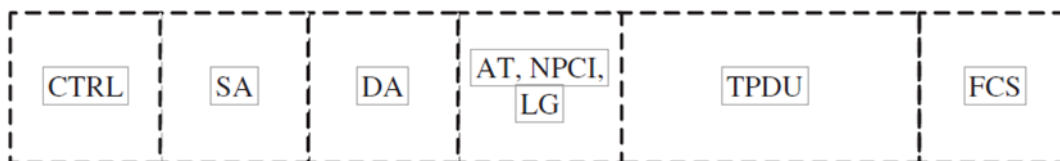


Σχήμα 5.4 Μετάδοση τηλεγράφων KNX.

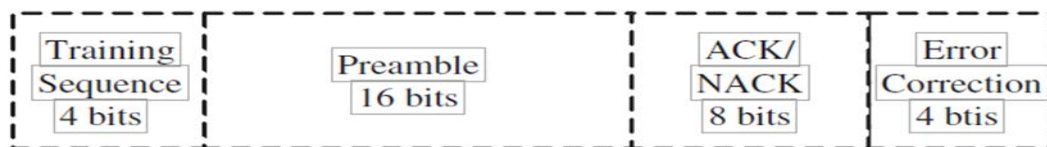
Χρησιμοποιεί κεντρική συχνότητα 110 kHz και ο ρυθμός είναι 1200 bit / s, ο οποίος αντιστοιχεί σε διάρκεια δυαδικού ψηφίου 833 μs. Η συχνότητα μετάδοσης λογικής «0» είναι 105,2 kHz ± 100 ppm και η συχνότητα μετάδοσης λογικής «1» είναι 115,2 kHz ± 100 ppm. Η μετάδοση ξεκινά από τη διασταύρωση του μηδενός του δικτύου με μέγιστο επίπεδο 122 dBμV σύμφωνα με το πρότυπο EN 50065-1 [3]. Κάθε τηλεγράφημα ξεκινά με μια ακολουθία εκπαίδευσης 4-bit και ένα προοίμιο 16-bit. Η ακολουθία εκπαίδευσης επιτρέπει στους δέκτες να προσαρμόζουν τη λήψη τους στις συνθήκες του δικτύου. Το πεδίο του προοιμίου έχει δύο σκοπούς. Πρώτον, σηματοδοτεί την έναρξη της μετάδοσης και δεύτερον, ελέγχει την πρόσβαση στο λεωφορείο. Όλες οι πληροφορίες πλαισίου, εκτός από την ακολουθία εκπαίδευσης και το προοίμιο, κωδικοποιούνται σε 12-bit χαρακτήρες που επιτρέπουν τη διόρθωση δυο δυαδικών ψηφίων στο μεταδιδόμενο χαρακτήρα όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4.

Η μονάδα δεδομένων πρωτοκόλλου πρωτοκόλλου (LPDU) συνδέει τα παρακάτω πεδία όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5.

- Πεδίο ελέγχου (CTRL): Περιέχει πληροφορίες σχετικά με την υπηρεσία σύνδεσης δεδομένων, την προτεραιότητά της (μηνύματα συναγερμού κ.λπ.), τον τύπο πλαισίου (τυπικό ή εκτεταμένο) και αν η LPDU είναι επαναλαμβανόμενη.
- Διεύθυνση πηγής (SA): Η μοναδική διεύθυνση του δημιουργού.
- Διεύθυνση προορισμού (DA): Η μοναδική διεύθυνση του κόμβου προορισμού ή η διεύθυνση προορισμού μιας ομάδας κόμβων (πολυεκπομπή).
- Τύπος διεύθυνσης (AT): Καθορίζει αν η διεύθυνση προορισμού ανήκει σε έναν μοναδικό κόμβο ή ομάδα κόμβων.
- Στοιχεία ελέγχου πρωτοκόλλου πρωτοκόλλου (NPCI): Ελεγχόμενη από το επίπεδο δικτύου και περιέχει τις πληροφορίες βήματος μέτρησης για τη δρομολόγηση.
- TPDU (μονάδα δεδομένων πρωτοκόλλου επιπέδου μεταφοράς): Το ωφέλιμο φορτίο από το ανώτερο επίπεδο.
- Μήκος (LG): Ορίζει το μήκος TPDU.
- Έλεγχος οκτάδας (FCS): Βοηθά στη διασφάλιση της συνέπειας των δεδομένων και της αξιόπιστης μετάδοσης.



Σχήμα 5.5 KNX πλαίσιο LPDU



Σχήμα 5.6 Τηλεγράφημα απάντησης KNX.

Το πρωτόκολλο KNX PL110 χρησιμοποιεί μηχανισμούς ελέγχου πρόσβασης μέσω (MAC) για την αποφυγή συσχέτισης και ένα τηλεγράφημα ACK / NACK πρέπει να μεταδοθεί από τον δέκτη για να ενημερώσει τη γεννήτρια τηλεγράφων σχετικά με την παράδοση του τηλεγραφήματος. Το τηλεγράφημα ACK αποτελείται από ακολουθία κατάρτισης 20-bit και προοίμιο, ακολουθούμενη από έναν μόνο χαρακτήρα που επιβεβαιώνει ή δεν αναγνωρίζει το ληφθέν τηλεγράφημα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6. Αν δεν αποσταλεί το τηλεγράφημα απάντησης, το τηλεγράφημα επαναλαμβάνεται [4].

### 5.7 KNX PL 110 Τοπολογία και αντιμετώπιση

Η λογική διευθυνσιοδότηση του KNX-PL 110 είναι συμβατή με το πρότυπο KNX-TP1 για μέσα μετάδοσης συνεστραμμένου ζεύγους. Το KNX οργανώνει συσκευές σε περιοχές και γραμμές, με έως 8 περιοχές, 16 γραμμές ανά περιοχή και 256 συσκευές ανά γραμμή. Σε μεγαλύτερες εγκαταστάσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν φίλτρα διακοπής ζώνης για φυσικό διαχωρισμό περιοχών [4].

### 5.8 KNX έναντι X10

Η εφαρμογή του συστήματος KNX είναι ακριβότερη από τη χρήση του X10. Η υλοποίηση είναι χρήσιμη μόνο αν πολλά συστήματα πρέπει να συνδεθούν μεταξύ τους ή εάν μια εγκατάσταση πρέπει να είναι πιο ευέλικτη ώστε να μπορεί να τροποποιηθεί γρήγορα και αποτελεσματικά.

### 5.9 LONWorks

Η τεχνολογία τοπικού λειτουργικού δικτύου (LONWorks) είναι μια ανοικτή λύση και πρωτόκολλο για την οικοδόμηση και τον αυτοματισμό στο σπίτι με βάση μια πλατφόρμα δικτύωσης για τον έλεγχο των απαιτούμενων εφαρμογών. Ένα δίκτυο ελέγχου είναι οποιαδήποτε ομάδα εφαρμογών που εργάζονται σε ένα σύστημα ελέγχου από άκρο σε άκρο για την παρακολούθηση αισθητήρων, ενεργοποιητών ελέγχου, την αξιόπιστη επικοινωνία, τη διαχείριση της λειτουργίας του δικτύου και την πλήρη πρόσβαση στα δεδομένα δικτύου. Οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές συνδέονται σε ένα υπο-πλαίσιο, το οποίο είναι συνδεδεμένο στον πίνακα ελέγχου μέσω ενός διαύλου επικοινωνίας master / slave. Σε ένα σύστημα LONWorks, οι έξυπνες μονάδες ελέγχου επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο LONWorks. Το LONWorks αναπτύχθηκε από την Echelon Corporation και εκτιμάται ότι μέχρι το 2010 έχουν εγκατασταθεί περίπου 90 εκατομμύρια συσκευές. Η τεχνολογία LONWorks λειτουργεί μέσω πολλαπλών μέσων, συμπεριλαμβανομένης της γραμμής ρεύματος, του συνεστραμμένου ζεύγους και της ασύρματης σύνδεσης [5].

Τα μόντεμ γραμμής ισχύος PL 3120 λειτουργούν σε πρωτεύουσα συχνότητα 132 kHz στη ζώνη C του EN 50065-1 και μπορούν να μεταβούν σε δευτερεύουσα συχνότητα 115 kHz και οι συσκευές PL 3150 χρησιμοποιούν μια κύρια συχνότητα 86 kHz στη ζώνη A EN 50065-1 και μπορεί να αλλάξει σε δευτερεύουσα συχνότητα 75 kHz. Επιπλέον, εφαρμόζεται διαμόρφωση δυαδικής βηματοδότησης φάσης (BPSK), η οποία παρέχει ταχύτητες δεδομένων 5,4 kbps σε ζώνη C ή 3,6 kbps σε ζώνη A [5].

### 5.10 DigitalSTROM®

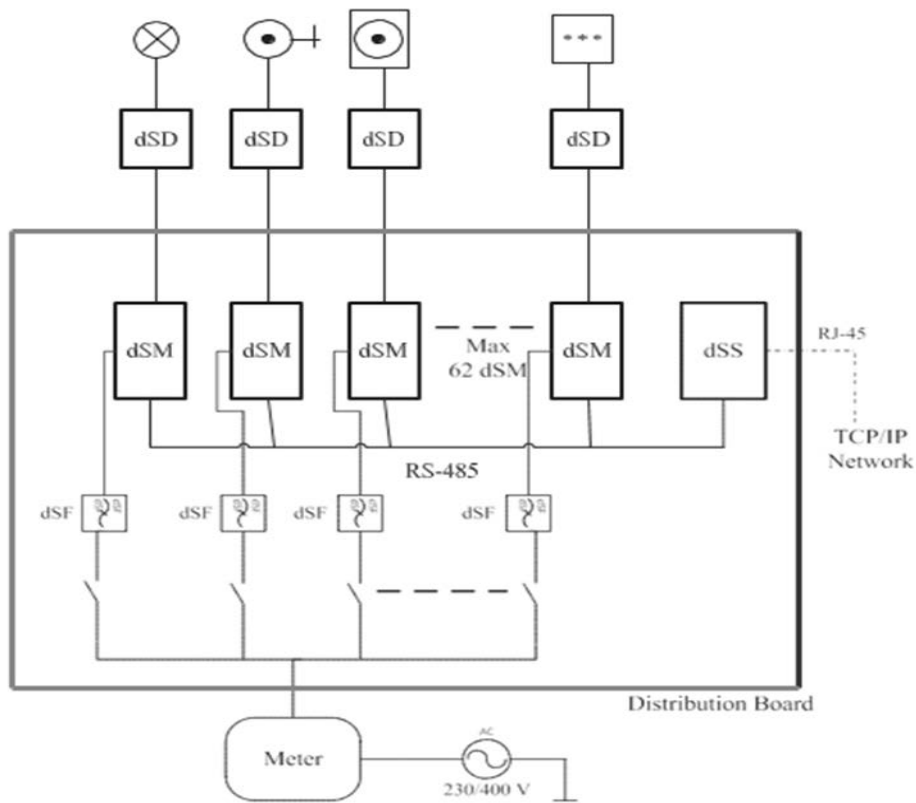
Η τεχνολογία digitalSTROM® είναι μια τεχνολογία PLC για «διαβίωση με έξυπνη ενέργεια» [11]. Η βασική ιδέα του digitalSTROM® είναι ότι οι εγκατεστημένες τεχνολογίες επικοινωνούν μέσω των υφιστάμενων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των διαφόρων εφαρμογών στο σπίτι σε διαμορφωμένα κανάλια πάνω και κάτω. Ο έλεγχος και η διαχείριση του συστήματος μπορούν να γίνουν μέσω κανονικών διακοπών, του διαδικτύου και των έξυπνων τηλεφώνων. Ο διακόπτης στο digitalSTROM® είναι ένα τσιπ υψηλής τάσης (220 V) 4 χιλιοστών × 6 χιλιοστών που είναι ενσωματωμένο στο κουτί συνδεσμολογίας digitalSTROM®. Το ενσωματωμένο τσιπ ενεργοποιεί / απενεργοποιεί την ηλεκτρική ενέργεια, επομένως, το digitalSTROM® δεν χρειάζεται καμία χωρητική σύζευξη ή γαλβανική απομόνωση. Οι συσκευές και οι οικιακές εφαρμογές πρέπει να εγκαταστήσουν μόνο αυτό το τσιπ.

### 5.11 Αρχιτεκτονική και Εξαρτήματα DigitalSTROM

Το DigitalSTROM® είναι ένα κεντρικό δίκτυο που βασίζεται σε εγκατεστημένους συγκεντρωτές στον πίνακα διανομής. Λειτουργεί ως μετρητής ισχύος για συγκεκριμένα κυκλώματα διανομής και επικοινωνεί με οικιακές συσκευές σε διαφορετικά διαμορφωμένα κανάλια προς τα πάνω και προς τα κάτω. Η βάση του digitalSTROM® είναι ένα τσιπ υψηλής τάσης που ονομάζεται τερματικό μπλοκ το οποίο μπορεί να αλλάξει, να μειώσει και να μετρήσει την ηλεκτρική ενέργεια στα συστήματα φωτισμού, να αποθηκεύσει δεδομένα και να επικοινωνήσει. Για τη χρήση των υφιστάμενων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος από το πάνελ διανομής σε συσκευές DigitalSTROM® (dSD), σε κάθε κύκλωμα ισχύος στον πίνακα διανομής εγκαθίσταται ένας ψηφιακός μετρητής (dSM). Πολλαπλά dSM (έως και 62 μονάδες) χρησιμοποιούν ένα τυποποιημένο πρωτόκολλο (διασύνδεση διαύλου dS485) για επικοινωνία. Η εγκατάσταση ενός προαιρετικού διακομιστή digitalSTROM® (dSS) επιτρέπει τη σύνδεση σε ένα σύστημα υψηλότερου επιπέδου, στο Internet ή σε ένα τοπικό δίκτυο. Τα φίλτρα DigitalSTROM® (dSF) είναι φίλτρα διέλευσης ζώνης για ζώνη CENELEC A και είναι εγκατεστημένα ανά φάση μεταξύ L και N upstream για να βελτιστοποιήσουν τις συνθήκες δικτύου για επικοινωνία digitalSTROM® ρυθμίζοντας το σήμα ισχύος για να μειώσουν την παρεμβολή με άλλες συσκευές.

### 5.12 Εξαρτήματα και Εγκατάσταση δικτύου DigitalSTROM® PLC

Η εγκατάσταση του digitalSTROM® χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική master-slave, στην οποία ένα dSM δημιουργεί τον κύριο επικοινωνίας για κάθε κύκλωμα. Ο κύριος επικοινωνεί μέσω της γραμμής ρεύματος με τους ακροδέκτες (σκλάβους) στο ίδιο κύκλωμα. Για παράδειγμα, αν το dSD καταγράψει μια κίνηση του διακόπτη, στέλνει ένα τηλεγράφημα στο dSM. Το dSM υπολογίζει τι πρέπει να κάνει και στέλνει την εντολή μέσω της γραμμής ρεύματος. Το σύστημα χρησιμοποιεί μια ασύγχρονη διαδικασία επικοινωνίας μεταξύ μετρητή και τερματικού, στην οποία το dSM μεταδίδει τις πληροφορίες στους ακροδέκτες στο κοινό ρεύμα. Προς τα πάνω (από dSD σε dSM), οι ακροδέκτες κωδικοποιούν τα σήματα τους ρυθμίζοντας την κατανάλωση ρεύματος. Τα dSM επικοινωνούν μεταξύ τους και με το dSS μέσω διασυνδέσεων RS485 και διασύνδεσης διαύλου dS485. Το dSS έχει διάφορες λειτουργίες. Συνδέει τα dSM και συνδέεται επίσης στο Internet μέσω TCP / IP, επιτρέποντας έτσι πρόσβαση σε όλες τις λειτουργίες δικτύου μέσω υπολογιστών ή έξυπνων τηλεφώνων. Τέλος, το dSF προστατεύει την επικοινωνία δικτύου και εγκαθίσταται ανά φάση μεταξύ L και N upstream . Τα εξαρτήματα και η τοπολογία του digitalSTROM® απεικονίζονται στο Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7 Εικόνα της δομής του DigitalSTROM®.



### 5.13 Επικοινωνία DigitalSTROM®

Για την επικοινωνία άνω και κάτω, μεταδίδονται διαφορετικά σήματα [12].

Επικοινωνία downstream: Η τεχνική μετάδοσης downstream του ψηφιακούSTROM® είναι να διακόπτει περιοδικά την πλακέτα διανομής από το δίκτυο τροφοδοσίας και να τοποθετεί το σήμα στην τάση του δικτύου σε στενή γειννίαση με τις διασταυρώσεις μηδενικού δικτύου, η οποία διαφέρει από άλλα κανονικά συστήματα PLC που προσθέτουν το μεταδιδόμενο σήμα στην τάση του δικτύου, το οποίο μειώνει τη διαβίβαση στα γειτονικά κυκλώματα που προκαλούνται από την σύνθετη αντίσταση του δικτύου. Η τεχνική αποκοπής πραγματοποιείται απλά μέσω ενός διακόπτη όπως ένας διακόπτης κυκλώματος που ανοίγει για την περίοδο της προς τα κάτω σηματοδότησης. Ο πομπός υλοποιείται χρησιμοποιώντας ημιαγωγούς ισχύος που λειτουργούν με έλεγχο σχηματισμού παλμών. Οι παλμοί αντιπροσωπεύονται από ένα λογικό '1' και ένα λογικό '0'. Ένας κώδικας Hamming (7,4) εφαρμόζεται για την ανίχνευση και τη διόρθωση σφαλμάτων. Ο πομπός κάτωθεν μπορεί να θεωρηθεί ως μια βέλτιστη πηγή τάσης που δεν επηρεάζει τη χαμηλή αντίσταση δικτύου, ιδιαίτερα τις τεχνολογίες PLC χαμηλού ρυθμού δυαδικών ψηφίων. Η εξασθένιση του σήματος πρέπει να είναι μικρή λόγω της χαμηλής σύνθετης αντίστασης και του μικρού μήκους των καλωδίων μέσα στα σπίτια. Δεν αναμένονται παρεμβολές κοντά στη μηδενική διέλευση λόγω των τροφοδοτικών τροφοδοσίας σε κατάσταση λειτουργίας.

Επικοινωνία προς τα πάνω: Η επικοινωνία προς τα πάνω βασίζεται στην κεντρική αρχιτεκτονική με ένα dSM για κάθε διακόπτη. Ο πομπός υλοποιείται ως πηγή ρεύματος. Το dSM εφαρμόζει έναν αισθητήρα ρεύματος στο ληφθέν σήμα. Πρόσθετοι πυκνωτές προστίθενται μεταξύ των ουδέτερων και των αγωγών φάσης για να διατηρηθεί χαμηλή η σύνθετη αντίσταση του πομπού και να αυξηθεί η στάθμη του σήματος στον δέκτη. Η upstream χρησιμοποιεί διαμόρφωση FSK για τις ζώνες CENELEC A ή B. Παρεμβολές από οικιακές συσκευές και συσκευές μεταγωγής αναμένονται. Ένας συνελκτικός κώδικας υλοποιείται με έναν διεμπλοκέα διατηρούν την αποτυχία συμβάντων κάτω από το μήκος περιορισμού του συνελκτικού κώδικα.

### 5.14 Αναφορές

1. E. Mainardi and M. Bonfe`, Powerline communication in home-building automation systems, in *Robotics and Automation in Construction*, (eds C. Balaguer and M. Abderrahim), InTech, 2008, ch. 4, 53–70.
2. J. Burroughs, X-10 home automation using the PIC16F877A, Microchip Technology Inc., Tech. Rep., 2002. [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00236a.pdf>
3. KNX System Specifications, KNX Association, Tech. Rep., 2009. [Online]. Available: [http://www.sti.uniurb.it/romanell/Domotica\\_e\\_Edifici\\_Intelligenti/110504-Lez10a-KNX-Architecture\\_v3.0.pdf](http://www.sti.uniurb.it/romanell/Domotica_e_Edifici_Intelligenti/110504-Lez10a-KNX-Architecture_v3.0.pdf)
4. KNX Powerline PL 110, KNX Association, Tech. Rep., Jun. 2007. [Online]. Available: <http://www.knx.org/media/docs/KNX-Tutor-files/Summary/KNX-Powerline-PL110.pdf>
5. Echelon Corporation. Introduction to the LONWorks system. United States of America. [Online]. Available: <http://www.echelon.com/support/documentation/manuals/general/078-0183-01A.pdf>

## Κεφάλαιο 6 : Συστήματα Πολυμέσων PLC

### 6.1 Εισαγωγή

Μια σημαντική κινητήρια δύναμη στην ανάπτυξη επικοινωνιών γραμμών υψηλής ταχύτητας ήταν η απρόσκοπτη παροχή πολυμέσων σε όλο το σπίτι χρησιμοποιώντας τις υπάρχουσες ηλεκτρικές καλωδιώσεις μέσα στο σπίτι.

Για την παροχή πολλαπλών ταυτόχρονων καναλιών φωνής, στερεοφωνικού ήχου υψηλής πιστότητας και σημάτων βίντεο υψηλής ευκρίνειας, ενώ συνυπάρχουν με την παραδοσιακή κυκλοφορία δεδομένων, τα πολυεθνικά δίκτυα PLC και τα συστήματα χρειάστηκε να σχεδιαστούν για να πληρούν τις αυστηρές προδιαγραφές ποιότητας υπηρεσίας (QoS).

Σε αυτή την ενότητα παρέχουμε μια περιγραφή καινοτόμων τεχνολογιών επικοινωνίας πολυμέσων PLC που παρέχουν αποδεκτά επίπεδα λανθάνουσας κατάστασης, jitter και αξιοπιστίας για την παροχή περιεχομένου πολυμέσων μέσω θορυβωδών και αναξιόπιστων καναλιών γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας.

### 6.2 Απαιτήσεις QoS για κυκλοφορία πολυμέσων

Το κανάλι PLC είναι γνωστό ότι μαστιάζεται από διάφορες πηγές θορύβου και παρεμβολών που έχουν κάνει μια αξιόπιστη επικοινωνία υψηλής ταχύτητας μια πρόκληση.

Η προδιαγραφή HomePlug 1.0.1 [3] παρείχε τα πρωτόκολλα πρώτου φυσικού επιπέδου (PHY) και ελέγχου πρόσβασης μέσων (MAC) που παρείχαν τάξη 10 Mbps PLC LAN χρησιμοποιώντας υπάρχουσες ηλεκτρικές καλωδιώσεις εντός κτιρίων.

Το τσιπ HomePlug 1.0.1 αποτέλεσε επίσης τη βάση ενός δικτύου πρόσβασης 10 Mbps ευρυζωνικότητας μέσω γραμμών ισχύος (BPL) χρησιμοποιώντας τις εισερχόμενες γραμμές διανομής χαμηλής τάσης [4].

Το σύστημα HomePlug 1.0.1 παρείχε θεωρητική μέγιστη απόδοση εφαρμογών περίπου 8 Mbps, με τυπική μέγιστη πρακτική 5-7 Mbps [5], [6], αρκετά κατάλληλη για πολλές εφαρμογές τοπικού δικτύου LAN.

Με αυτό τον τρόπο, το κανάλι PLC, που χρησιμοποιήθηκε μόνο για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, εισήλθε στην ψηφιακή εποχή, παρέχοντας τώρα ένα ψηφιακό σωλήνα υψηλής ταχύτητας στο σπίτι με εσωτερικό δίκτυο επικοινωνίας πολυμέσων «χωρίς νέα καλώδια».

Αν και δεν έχουν βελτιστοποιηθεί για την επικοινωνία πολυμέσων, τα συστήματα

HomePlug 1.0.1 θα μπορούσαν επίσης να υποστηρίξουν τη Voice over IP (VoIP), καθώς και την IP Τηλεόραση (IPTV) χρησιμοποιώντας κάποια παραλλαγή των πλέον δημοφιλών ρυθμιστικών μηχανισμών ροής [7].

Αυτές οι δύο εφαρμογές πολυμέσων - VoIP και IPTV - απεικονίζουν μερικές από τις προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν επιτυχώς από συστήματα PLC που στοχεύουν την κυκλοφορία πολυμέσων. Στο ένα άκρο του φάσματος η κίνηση VoIP συνεπάγεται τη μετάδοση σχετικά μικρών πακέτων (10 - 15 ms σε διάρκεια) σε σχεδόν συμμετρικούς ρυθμούς αμφίδρομης μεταφοράς δεδομένων περίπου 100 kbps αλλά με τον περιορισμό ότι αυτά τα πακέτα πρέπει να παραδοθούν μέσα σε στενά όρια καθυστέρησης που συνδέονται με 10 δευτερόλεπτα για τη διευκόλυνση της αλληλεπίδρασης και της φυσικότητας στην ανθρώπινη επικοινωνία.

Οι εφαρμογές φωνής είναι πολύ ανεκτικές σε μέτρια ποσοστά απώλειας πακέτων και ανά μεταβολή καθυστέρησης πακέτου (jitter), υπό την προϋπόθεση ότι είμαστε πρόθυμοι να δεχτούμε οριακή υποβάθμιση της ποιότητας φωνής.

Από την άλλη πλευρά, το IPTV χρησιμοποιεί υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων (1- 4 Mbps) με απαιτήσεις ασυμμετρικού εύρους ζώνης και για βέλτιστη εμπειρία χρήστη θα πρέπει να παρουσιάζουν πολύ χαμηλό θόρυβο και σχεδόν καμία απώλεια βίντεο λόγω απώλειας πακέτων. Δεδομένου ότι η υπηρεσία IPTV είναι μια υπηρεσία μετάδοσης μη διαδραστικής υπηρεσίας, μπορούμε να αποκαταστήσουμε έως και αρκετά εκατοντάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου των δεδομένων πολυμέσων και να διασφαλίσουμε ότι η επακόλουθη εμπειρία αναπαραγωγής είναι αποδεκτή για τους ενθουσιώδες του βίντεο και της υψηλής πιστότητας ήχου ακροατήριο. Σε όλες τις περιπτώσεις, είναι επιθυμητό το δίκτυο πολυμέσων να καλύπτει ολόκληρο το σπίτι ή το κτίριο απρόσκοπτα.

Τα παραπάνω ζητήματα που σχετίζονται με την παράδοση περιεχομένου πολυμέσων, τα οποία παρουσιάζονται τόσο καλά με VoIP και IPTV, μπορούν να επεκταθούν και να κλιμακωθούν για άλλα υπάρχοντα και αναδυόμενα περιεχόμενα πολυμέσων, όπως η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας, τηλεδιάσκεψη πολυμέσων υψηλής πιστότητας, πολυμέσα κ.λπ.

### *6.2.1 Πολυμεσική δικτύωση στο σπίτι*

Ο Πίνακας 6.1 συνοψίζει τις τυπικές απαιτήσεις QoS για διάφορα περιεχόμενα πολυμέσων που θα μπορούσαν να παρέχονται μέσω δικτύων πολυμέσων PLC.

#### *6.2.1.1 Χαρακτηριστικά κυκλοφορίας πολυμέσων*

Ο πίνακας παρουσιάζει μια ποικιλία περιεχομένου πολυμέσων, που κυμαίνεται από ψηφιακό βίντεο, ήχο, φωτογραφίες και εικόνες καθώς και διαδραστικές υπηρεσίες όπως τηλεδιασκέψεις, φωνή και παιχνίδια. Κάθε μια εξ αυτών των ομάδων εφαρμογών περιγράφεται

σύντομα στη συνέχεια.

Application	Bandwidth [Mbps]	Latency [ms]	Jitter	Packet Loss Probability (PLP)
High Definition (HD) Video Streaming	11–25	100–300	0.5 μs to several msec	Quasi Error Free*
Standard Definition TV (SDTV) Video Streaming	2–6	100–300	0.5 μs to several msec	Quasi Error Free
IPTV	1–4	100–300	0.5 μs to several msec	Quasi Error Free
DVD Quality Video	6–8	100–300	0.5 μs to several msec	Quasi Error Free
Internet Video Conferencing	0.1–2	75–100	—	10 <sup>-3</sup>
Home Theater Audio (Multiple streams of audio)	4–6	100–300	0.5 μs to several μs	Quasi Error Free
Voice over IP (VoIP)	< 0.064	10–30	10–30 msec	10 <sup>-2</sup>
Network Gaming	< 0.1	10–30	10–30 msec	Quasi Error Free

Πίνακας 6. 1 Απαιτήσεις Bandwidth και QoS για εφαρμογές πολυμέσων

\* Λιγότερο από ένα σφάλμα σε δύο ώρες

#### 6.2.1.1.1 Η ψηφιακή βιντεοταινία

Το ψηφιακό βίντεο και ήχος αποτελούν τον κύριο όγκο της κυκλοφορίας πολυμέσων που συναντάμε σήμερα. Οι πρώτες μορφές ψηφιακού βίντεο περιελάμβαναν ψηφιακές μορφές για ροή βίντεο σε διάφορες ταχύτητες και αναλύσεις από εφαρμογές όπως το RealPlayer1 ή το Microsoft Media Player2. Τα πρωτόκολλα ροής που σχετίζονται με αυτές τις τεχνολογίες παρέχουν προσαρμογή στο διαθέσιμο εύρος ζώνης χρησιμοποιώντας ένα ρυθμισμένο μηχανισμό αναπαραγωγής. Αυτές οι μέθοδοι εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται σήμερα για εκπομπές IPTV μέσω του Διαδικτύου.

Οι ψηφιακοί δίσκοι βίντεο (DVD) και τα φορμά HDTV κυμαίνονται σε ρυθμούς δεδομένων από 5-25 Mbps είναι επίσης διαθέσιμα και μπορούν να αναπαραχθούν από συσκευή αναπαραγωγής DVD ή συσκευή αναπαραγωγής HDTV (όπως το BluRay) ή να παίζονται μέσω οικιακού δικτύου από κεντρικό διακομιστή πολυμέσων. DVD και HDTV χρησιμοποιούν τεχνικές συμπίεσης βασισμένες στις μορφές MPEG-2 και MPEG-4 που αναπτύχθηκαν από την Ομάδα εμπειρογνομόνων ταινιών κίνησης (MPEG).

#### 6.2.1.1.2 Φωτογραφίες και εικόνες

Φωτογραφίες και οι εικόνες αποτελούν ένα άλλο δημοφιλές περιεχόμενο πολυμέσων που πρέπει να μεταδίδεται μέσω οικιακού δικτύου. Ψηφιακές εικόνες και εικόνες που λαμβάνονται μέσω ψηφιακών ψηφιακών σαρώσεων ή ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών με αναλύσεις αρκετών μεγα-εικονοστοιχείων μπορούν επίσης να αποθηκευτούν σε κεντρικό διακομιστή πολυμέσων και οι προβολές διαφανειών μπορούν να δημιουργηθούν σε μια οθόνη με λήψη και εμφάνιση των εικόνων σε σειρά. Κάθε εικόνα μπορεί να έχει μέγεθος αρκετών megabytes και αυτές οι προβολές διαφανειών θα έχουν σημαντικό αντίκτυπο στο οικιακό δίκτυο. Οι ψηφιακές φωτογραφίες και οι σαρωμένες εικόνες αποθηκεύονται συχνά στη μορφή JPEG (Joint Pictures Expert Group) ή σε μορφότυπο ανταλλαγής γραφικών (GIF). Στην

πραγματικότητα, είναι δυνατό να δημιουργηθεί βίντεο κίνησης χρησιμοποιώντας την κίνηση JPEG - που παίζει αποτελεσματικά πλαίσια ακρόασης με κατάλληλο ρυθμό καρτέ.

#### 6.2.1.1.3 Ήχος - Μουσική και ομιλία

Ο μεγάλης πιστότητας στερεοφωνικός (ή πολυφωνικός ήχος surround) είναι μια άλλη σημαντική συνιστώσα στα οικιακά συστήματα πολυμέσων. Συχνά τα ηχητικά κανάλια συγχρονίζονται με το βίντεο σε παρουσιάσεις DVD ή HDTV και αυτά μεταδίδονται ταυτόχρονα μέσω του καναλιού δικτύου, χωρίς σημαντικά προβλήματα χρονικής μεταβολής ή προβλήματα συγχρονισμού εικόνας ήχου. Στις εφαρμογές ραδιοφωνικής μετάδοσης, το βίντεο και ο ήχος μπορούν να ρυθμιστούν, να αποσυμπιεστούν και να αναπαραχθούν με τη σωστή σειρά και ρυθμό για να δώσουν τη βέλτιστη ποιότητα.

#### 6.2.1.1.4 Διαδραστική φωνή και βίντεο

Εφαρμογές όπως η τηλεδιάσκεψη και το VoIP επιβάλλουν την πρόσθετη απαίτηση της αμφίδρομης αυθόρμητης αλληλεπίδρασης, με την συνεπαγόμενη ανάγκη για ψυχολογικά ευχάριστη ανταπόκριση. Αυτές οι εφαρμογές παρέχονται καλύτερα σε μια καναλιού μορφή στην οποία μια συγκεκριμένη κατανομή των πόρων καναλιού είναι δεσμευμένη για κάθε κατεύθυνση της ανταλλαγής βίντεο και ήχου.

Ένα οικιακό δίκτυο σχεδιασμένο να χειρίζεται πολλαπλά κανάλια VoIP καθώς και βιντεοδιάσκεψη χρειάζεται να εξετάσει αυτές τις απαιτήσεις σε συνδυασμό με την κατάλληλη συμπίεση για να διατηρήσει το εύρος ζώνης και να ενισχύσει τη διαδραστικότητα.

#### 6.2.1.1.5 Gaming και προσομοιώσεις

Τα παιχνίδια και οι προσομοιωτές που βασίζονται στο δίκτυο για πολλούς παίκτες, όπως οι προσομοιωτές πτήσης, θέτουν επίσης μεγάλες απαιτήσεις για διαδραστικότητα και υψηλή ποιότητα βίντεο και ήχου στο υποκείμενο δίκτυο.

Ορισμένοι προσομοιωτές και παιχνίδια έχουν ζωντανά βίντεο ή γραφικά υψηλής ποιότητας που πρέπει να φορτωθούν, να εμφανιστούν και να αποτυπωθούν όσο πιο γρήγορα οι παίκτες κάνουν κινήσεις - δημιουργώντας έτσι την ανάγκη για συγχρονισμό, αλληλεπίδραση και φυσικότητα.

#### 6.2.1.2 Ποιότητα των παραμέτρων υπηρεσίας

Για κάθε κύριο τύπο περιεχομένου πολυμέσων, ο Πίνακας 6.1 παρουσιάζει επίσης τέσσερις κύριες παραμέτρους, δηλαδή το εύρος ζώνης, την απώλεια πακέτων, την καθυστέρηση και το jitter, που χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση της ποιότητας της υπηρεσίας.

##### 6.2.1.2.1 Εύρος ζώνης

Η κυκλοφορία πολυμέσων, όπως το βίντεο και η φωνή, αποδίδει καλύτερα όταν είναι διαθέσιμο το εγγυημένο εύρος ζώνης, ώστε να επιτρέπεται η υποστήριξη του μέγιστου

αναμενόμενου ρυθμού μετάδοσης της ροής χωρίς συμφόρηση.

Για παράδειγμα, η παραδοσιακή πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDM) παρέχει σταθερές κατανομές εύρους ζώνης που υποστηρίζουν τυπική τηλεφωνία με ασυμπιεστη φωνή που καταλαμβάνει ταχύτητα 64 kbps και βίντεο βασισμένο σε ISDN που απαιτεί πολλαπλά κανάλια 64 kbps Basic Rate Interface. Ωστόσο, σε ένα κοινό δίκτυο όπως το Διαδίκτυο ή ένα δίκτυο LAN που βασίζεται σε τεχνολογίες Ethernet ή ασύρματου ή PLC, η κατανομή του εύρους ζώνης για την κυκλοφορία πολυμέσων γίνεται πολύ πιο εμπλεκόμενη και απαιτούνται πολύπλοκες στρατηγικές διαχείρισης εισόδου και διαχείρισης της συμφόρησης για την εξασφάλιση QoS.

Παρόλα αυτά, είναι βέβαιο ότι οι υπηρεσίες όπως τα πολλαπλά κανάλια HDTV, IPTV και VoIP δεν μπορούν να εξεταστούν εκτός αν το συνολικό διαθέσιμο κανάλι μέσω της τοποθέτησης είναι επαρκές. Έτσι μια σημαντική προσπάθεια στο PLC πολυμέσων είναι να παρέχει το μεγαλύτερο δυνατό ρυθμό ανεπεξέργαστων δεδομένων των φασματικών και ρυθμιστικών περιορισμών.

Η τρέχουσα διαθέσιμη τεχνολογία PLC παρέχει ένα ρυθμό δεδομένων περίπου 200 Mbps στη ζώνη 2-30 MHz, με εύχρηστο εύρος ζώνης εφαρμογής περίπου 90 Mbps, αφού ληφθούν υπόψη επιβαρύνσεις διαχείρισης πρωτοκόλλου και σφαλμάτων. Χρησιμοποιώντας ένα εύρος ζώνης μέχρι 100 MHz και MIMO, ο ρυθμός δεδομένων ανεβαίνει σε περίπου 500 Mbps.

#### *6.2.1.2.2 Απώλεια και καθυστέρηση του πακέτου*

Η καθυστέρηση που υφίσταται ένα πακέτο δεδομένων καθώς διασχίζει το κανάλι της γραμμής ρεύματος αποτελείται από έναν αριθμό παραγόντων που συμβάλλουν στην παραμόρφωση, όπως καθυστερήσεις επεξεργασίας και διάδοσης και αναμετάδοσης. Αποδεικνύεται ότι η συνολική καθυστέρηση κυριαρχείται από την συνεχώς υπάρχουσα ανάγκη για επανεκπομπές στο κανάλι PLC.

Ακόμη και μετά τη χρήση ισχυρής κωδικοποίησης ελέγχου σφαλμάτων, το κανάλι γραμμής ρεύματος μπορεί να έχει ρυθμούς σφάλματος μπλοκ διόρθωσης FEC τόσο υψηλό όσο 1 στο 100 ή χειρότερο. Για να επιτευχθεί ένα ποσοστό σφάλματος μπλοκ των  $10^{-10}$  (χωρίς σχεδόν σφάλμα), όπως απαιτείται για την ικανοποίηση των απαιτήσεων QoS για ορισμένες εφαρμογές πολυμέσων, μπορεί να χρειαστούν έως και πέντε αναμεταδόσεις. Εφαρμογές όπως HDTV, SDTV ή streaming μουσικής επιτρέπουν μια αρχική καθυστέρηση, για παράδειγμα 100-300 ms και αυτή τη φορά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να φιλοξενήσει τις απαιτούμενες αναμεταδόσεις. Οι διαδραστικές εφαρμογές όπως τα τυχερά παιχνίδια, η VoIP και η τηλεδιάσκεψη που δεν μπορούν να ανεχθούν τέτοιες μεγάλες καθυστερήσεις θα χρειαστεί να μειώσουν ή να αντικαταστήσουν τα πακέτα και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε κάποια αναπόφευκτη ποιοτική υποβάθμιση.

### 6.2.1.2.3 Jitter

Το Jitter είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη μεταβολή της καθυστέρησης που μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες ενέργειες στην κυκλοφορία πολυμέσων. Εξετάστε, για παράδειγμα, την περίπτωση απλοποίησης HDTV στην οποία χρησιμοποιείται μια αρχική καθυστέρηση 300 ms για την υποδοχή των απαιτούμενων αναμεταδοτών πακέτων. Τώρα, εάν όλα τα πακέτα καθυστερήσουν (αποθηκευτούν και αναπαραχθούν) με αυτή την ίδια καθυστέρηση 300 ms σε σχέση με την έναρξη του πρώτου πακέτου που αναπαράγεται, τότε το jitter θα είναι ακριβώς μηδέν. Στην πράξη, είναι επιθυμητή μια τιμή jitter για τέτοιες εφαρμογές των περίπου 500 νανοδευτερόλεπτα και τα πρωτόκολλα PLC πολυμέσων θα πρέπει να παρέχουν αυτή τη δυνατότητα.

### 6.2.1.3 Η Λύση PLC για κυκλοφορία πολυμέσων

Από τα παραπάνω είναι σαφές ότι ενώ το HomePlug 1.0.1 παρείχε αποδεκτά ποσοστά δεδομένων (5 - 7 Mbps) και επιδόσεις για επικοινωνιακές ανάγκες επικοινωνίας σε πολλούς υπολογιστές και περιφερειακά σε μια ρύθμιση LAN, υψηλότεροι ρυθμοί δεδομένων και αυστηρότεροι έλεγχοι QoS που χρειάζονται για να υποστηρίξουν την ψηφιακή επικοινωνία πολυμέσων μέσα στο σπίτι.

Για παράδειγμα, όπως παρατηρήθηκε νωρίτερα, ένα μόνο ρεύμα HDTV απαιτεί περίπου 25 Mbps και ένα τυπικό οικιακό σενάριο μπορεί να έχει πολλές ταυτόχρονες ροές πολυμέσων φωνής, ήχου και βίντεο, μαζί με την παραδοσιακή μη ευαίσθητη στο χρόνο ροή του δικτύου. Επιπλέον, πέραν του εύρους ζώνης, οι εφαρμογές πολυμέσων έχουν επίσης προδιαγραφές προδιαγραφών λανθάνοντος χρόνου, jitter και πιθανότητας απώλειας πακέτων (PLP) που πρέπει να πληρούνται για βέλτιστη απόδοση, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.1.

Αξίζει να σημειωθεί εν τω μεταξύ ότι υπάρχουν πολλές πιθανές εναλλακτικές λύσεις έναντι του PLC για επικοινωνίες πολυμέσων. Αυτές περιλαμβάνουν τεχνολογίες όπως 100 Mbps και ακόμη Ethernet Gbps (gigabit ανά δευτερόλεπτο), τη δημοφιλή σουίτα ασύρματων πρωτοκόλλων IEEE 802.11x (συμπεριλαμβανομένου του αναδυόμενου προτύπου IEEE 802.n [9]), το νεότερο πρότυπο Ultra-Wide Band [10] παρέχοντας υψηλό εύρος ζώνης αλλά περιορισμένη πρόσβαση και άλλα, όπως το πρότυπο Multica over Coax Alliance (MoCA) [11] που χρησιμοποιεί εξερχόμενες καλωδιώσεις ομοαξονικού βίντεο και δίκτυα Phoneline (HomePNA) [12] που χρησιμοποιούν τηλεφωνικές καλωδιώσεις. Η ελκυστικότητα της λύσης PLC έγκειται στην πανταχού παρούσα της, με κατά μέσο όρο περίπου 44 σημεία πώλησης ήδη διαθέσιμα στα σπίτια (στις Η.Π.Α.), καθώς και την εμβέλειά της στην παροχή, στις περισσότερες περιπτώσεις, κάλυψης ολόκληρης οικίας με αποδεκτά ποσοστά δεδομένων.



### 6.3 Βελτιστοποίηση PLC για πολυμέσα

Η πρώτη πρόκληση για την ανάπτυξη ενός συστήματος PLC κατάλληλο για κυκλοφορία πολυμέσων είναι ο σχεδιασμός των πρωτοκόλλων PHY και MAC μαζί με τις απαιτούμενες αλληλεπιδράσεις MAC / PHY διασταυρούμενων επιπέδων, ώστε να εξασφαλίζεται επαρκές εύρος ζώνης για την υποστήριξη πολλαπλών ταυτόχρονων καναλιών φωνητικού βίντεο και δεδομένων.

#### 6.3.1 Γενικές εκτιμήσεις σχεδιασμού για PLC πολυμέσων

##### 6.3.1.1 Πολλαπλασιαστικά εφέ, θόρυβος και παρεμβολές στο κανάλι PLC

Από τη φύση τους, οι ηλεκτρικές καλωδιώσεις εντός κτιρίων, που αποτελούνται από σχεδόν τυχαία διασύνδεση και ποικιλία τύπων αγωγών, παρουσιάζουν τερματικές σύνθετες αντιστάσεις που ποικίλλουν ανάλογα με τη συχνότητα και το χρόνο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο πολλαπλών διαδρομών που προκαλεί καθυστέρηση μετάδοσης (κατά μέσο όρο λίγα μικροδευτερόλεπτα) καθώς και βαθιά εξασθένηση σήματος μέχρι 70 dB σε ορισμένες συχνότητες εντός της ζώνης 2β - 30 MHz που χρησιμοποιείται σήμερα από τις επικοινωνίες PLC. Ο σχεδιασμός PHY για το κανάλι PLC πρέπει επίσης να αντιμετωπίσει ένα πανταχού παρόν και ποικίλο σύνολο πηγών θορύβου PLC, όπως λυχνίες αλογόνου και λαμπτήρων φθορισμού, μεταγωγείς τροφοδοτικών, μοτέρ βούρτσας και διακόπτες dimmer, για να αναφέρουμε μερικές. Από την άποψη αυτή πρέπει να σημειωθεί ότι ένας σχεδιασμός PLC πολυμέσων θα πρέπει να αναγνωρίζει και να εκμεταλλεύεται τη γνωστή κυκλική μεταβολή του θορύβου εντός του κύκλου της γραμμής ισχύος, με τον καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο να συμβαίνει κοντά στα μηδενικά διαστήματα του κύκλου.

Δεδομένου ότι οι συσκευές PLC που κυκλοφορούν σήμερα λειτουργούν στην περιοχή 2-30 MHz, πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε να αποφευχθεί η πρόκληση παρεμβολών ή να επηρεαστούν από άλλα νόμιμα σήματα, όπως ραδιοκύματα μικρού μήκους, πολίτες και ερασιτέχνες, ενώ παράλληλα να μεγιστοποιηθεί η ικανότητα προσαρμογής

##### 6.3.1.2 Επιλογές σχεδιασμού PLC πολυμέσων

Τα τελευταία χρόνια, μια σειρά συστημάτων PLC 200 Mbps προέκυψε από τους σημαντικότερους παίκτες της αρένας ανάπτυξης chip PLC [16] - [18]. Μια κοινή προσέγγιση κατάλληλη για τα φυσικά χαρακτηριστικά του καναλιού PLC που περιγράφηκε παραπάνω είναι η χρήση του OFDM, είτε με το μετασχηματισμό γρήγορου Fourier (FFT) είτε με το μετασχηματισμό Wavelet ως την υποκείμενη τεχνολογία. Είναι πέρα από το πεδίο αυτής της ενότητας να συζητήσουμε τις διαφορές και τις ομοιότητες μεταξύ των προσεγγίσεων που βασίζονται σε FFT και Wavelet. Αρκεί να πούμε ότι και οι δύο μέθοδοι με τις κατάλληλες επιλογές σχεδιασμού βασικών λειτουργιών, μήκους συμβόλων, διαστήματα προστασίας,

διαμόρφωσης, κώδικα διόρθωσης σφαλμάτων και επιλογές παραθύρου μπορούν να αποδώσουν συγκρίσιμα επίπεδα απόδοσης. Στο υπόλοιπο τμήμα αυτής της παραγράφου γίνεται αναφορά στο σύστημα OFDM με βάση το FFT που χρησιμοποιείται στο HomePlug AV.

Η επιλογή του OFDM είναι κατάλληλη για τα κανάλια PLC, καθώς η σχετική προσέγγιση πολλαπλών φορέων επιτρέπει τη χρήση προσαρμοστικών σχημάτων διαμόρφωσης πολλαπλών επιπέδων στα υπο-κανάλια επιπέδου διαχωρισμού που ορίζονται από το OFDM από το εκλεκτικό κανάλι συχνότητας 2 - 30 MHz. Επιπλέον, οι παράμετροι OFDM μπορούν να οριστούν έτσι ώστε να επιβάλλουν φασματική μάσκα λειτουργίας για να αποφευχθεί η παραβίαση ρυθμιστικών ορίων ή ορίων παρεμβολής.

Είναι γενικά αποδεκτό ότι για συστήματα πολυμέσων PLC, μια προσέγγιση TDMA είναι επιθυμητή για να συμπληρώσει την προσέγγιση CSMA / CA που χρησιμοποιείται στο HomePlug 1.0.1 και άλλα πρωτόκολλα δεδομένων που λειτουργούν σε θορυβώδη περιβάλλοντα. Φυσικά η συνδυασμένη χρήση των TDMA και CSMA / CA στο ίδιο μέσο εισάγει μεγάλη πολυπλοκότητα αλλά αυτή είναι η τιμή που πρέπει να πληρώσουμε για τις εγγυήσεις QoS που απαιτούνται για την κυκλοφορία πολυμέσων.

Βασική ανάγκη είναι η αξιόπιστη επικοινωνία κρίσιμων παραμέτρων του υβριδικού συστήματος TDMA / CDMA σε όλους τους κόμβους του δικτύου PLC. Για να επιτευχθεί αυτό, το HomePlug AV ορίζει ένα σύνολο επιλογών δυναμικής διαμόρφωσης χαμηλής ταχύτητας δεδομένων (ROBO) που χρησιμοποιούν υψηλό βαθμό πλεονασμού χρόνου και συχνότητας, καθώς και χαμηλή σειρά διαμόρφωσης και ισχυρούς κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων. Η λειτουργία ROBO χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή κρίσιμων πληροφοριών μεταξύ του πομπού και του δέκτη και στη συνέχεια γίνεται διαπραγμάτευση ενός προσαρμοστικού τρόπου υψηλής ταχύτητας μεταξύ των ζευγών επικοινωνούντων κόμβων χρησιμοποιώντας ρυθμιζόμενους χάρτες τόνων για τον καθορισμό των επιλεγμένων φορέων, τη διαμόρφωση και την κωδικοποίηση επικοινωνίας μεταξύ κόμβων. Για να διατηρηθεί η απόδοση του δικτύου, κάθε πακέτο PLC περιέχει ένα εξαιρετικά αξιόπιστο πεδίο πλαισίου ελέγχου (FC) που χρησιμοποιεί χαρακτηριστικά παρόμοια με ROBO για να διασφαλίσει ότι οι βασικές παράμετροι PLC ενημερώνονται και λαμβάνονται αξιόπιστα.

#### 6.4 Πρότυπα για την ευρυζωνική τεχνολογία δικτύων PLC

Μια σημαντική προϋπόθεση για τη μαζική ανάπτυξη της τεχνολογίας ευρυζωνικών PLC και για εφαρμογές πολυμέσων ειδικότερα, είναι ένα διεθνές πρότυπο που εκδίδεται από έναν αξιόπιστο και παγκοσμίως αναγνωρισμένο φορέα που καθορίζει πρότυπα. Η έλλειψη διεθνούς τυποποίησης οδήγησε αρχικά στον κατακερματισμό της αγοράς οικιακής δικτύωσης. Στην πραγματικότητα, η αγορά οικιακής δικτύωσης PLC περιελάμβανε κυρίως τρεις βιομηχανικές λύσεις: τη Συμμαχία HomePlug Powerline Alliance (HPA), τη Συμμαχία Ισχύος Υψηλής Ευκρίνειας (HD-PLC) και την Universal Powerline Association (UPA). Επιπλέον, δεδομένου ότι οι διάφορες τεχνολογίες PLC που είναι διαθέσιμες πριν από μία δεκαετία δεν αλληλεπιδρούν, η κατάσταση είναι πολύ ενοχλητική για τους καταναλωτές, τις εταιρείες καταναλωτικών ηλεκτρονικών ειδών και τους παρόχους υπηρεσιών. Η σύγχυση των καταναλωτών από μόνη της οδηγεί συνήθως σε υψηλότερα ποσοστά επιστροφής, γεγονός που αποτελεί πρόβλημα πολλών δισεκατομμυρίων δολαρίων για τις εταιρείες ηλεκτρονικών ειδών ευρείας κατανάλωσης.

Η ομάδα εργασίας IEEE P1901 για τα εταιρικά πρότυπα [20] και η ομάδα μελέτης ITU-T 15 Ερώτηση 18 ξεκίνησε τις εργασίες τυποποίησης του 2005 για την εξάλειψη αυτού του θεμελιώδους φραγμού στην ανάπτυξη και εξάπλωση δικτύων οικιακής δικτύωσης και πρόσβασης βασισμένων στην τεχνολογία PLC. Αυτές οι δύο ομάδες έχουν οριστικοποιήσει δύο πρότυπα BB-PLC, τα IEEE 1901 [21], [22] και ITU-T G.996x (ή G.hn) [23] και [28] -PCC πρότυπο συνύπαρξης G.9972 (ή G.cx) [29], [30]. Αυτές οι λύσεις περιλαμβάνουν το φυσικό (PHY) στρώμα και το υποστρώμα πρόσβασης MAC (Media Access Layer) του στοιχείου ζεύξης δεδομένων του Βασικού Μοντέλου Αναφοράς Διασύνδεσης Ανοικτών Συστημάτων (OSI).

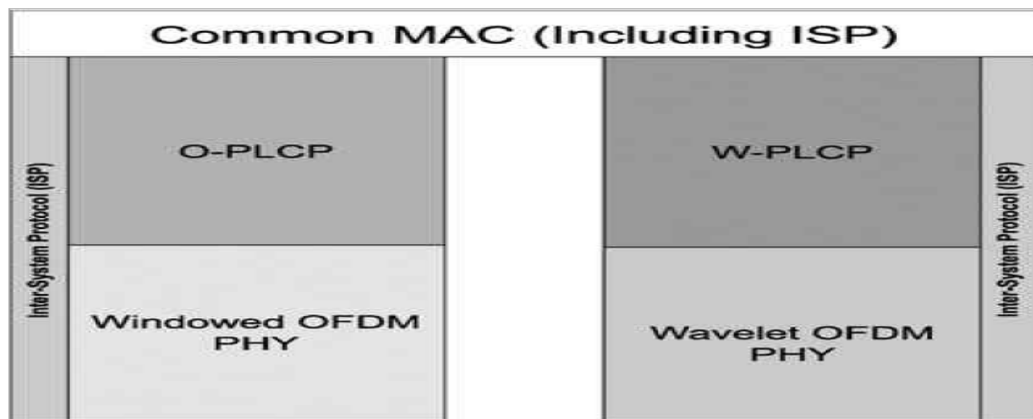
Τα ανώτερα στρώματα της στοίβας πρωτοκόλλων είναι γενικά. Στις επόμενες δύο ενότητες, τα πρότυπα IEEE και ITU-T θα συζητηθούν λεπτομερώς..

#### 6.5 Το πρότυπο IEEE 1901 Broadband Over Power Line

Η ομάδα εργασίας IEEE 1901 συστάθηκε το 2005 για την ενοποίηση των τεχνολογιών γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με στόχο την ανάπτυξη ενός προτύπου για συσκευές επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας (> 100 Mb / s) που χρησιμοποιούν συχνότητες κάτω των 100 MHz και απευθύνονται τόσο σε εφαρμογές οικιακής δικτύωσης όσο και σε εφαρμογές πρόσβασης [21], [22]. Το πρότυπο επικυρώθηκε το 2010 και ορίζει δύο τεχνολογίες PLC (PHY / MAC βασισμένο σε FFT-OFDM και PHY / MAC βασισμένο σε Wavelet-OFDM) και πρωτόκολλο συνύπαρξης PLC (Inter-System Protocol ή ISP). Σύμφωνα με το πεδίο εφαρμογής

του IEEE 1901, το πρότυπο θα είναι χρησιμοποιήσιμο από όλες τις κατηγορίες συσκευών PLC, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που χρησιμοποιούνται για τις ευρυζωνικές υπηρεσίες πρώτου μιλίου / τελευταίου μίλι (<1500 m έως το χώρο προετοιμασίας) καθώς και συσκευές που χρησιμοποιούνται εντός κτιρίων για LAN και άλλη διανομή δεδομένων (<100 m μεταξύ συσκευών).

Η προδιαγραφή FFT-OFDM 1901 PHY διευκολύνει την συμβατότητα προς τα πίσω με συσκευές που βασίζονται στις προδιαγραφές του κλάδου HomePlug AV. Ομοίως, η προδιαγραφή Wavelet-OFDM 1901 PHY διευκολύνει την συμβατότητα προς τα πίσω με συσκευές που βασίζονται στις προδιαγραφές του κλάδου HD-PLC Alliance. προδιαγραφές του κλάδου. Μια εννοιολογική επισκόπηση του προτύπου IEEE 1901 PHY και MAC παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1 Εννοιολογική επισκόπηση του IEEE 1901.

Η κοινή MAC διαχειρίζεται τα δύο διαφορετικά PHY μέσω ενός ενδιάμεσου στρώματος που ονομάζεται πρωτόκολλο σύγκλισης φυσικής στρώσης (Physical Layer Convergence Protocol).

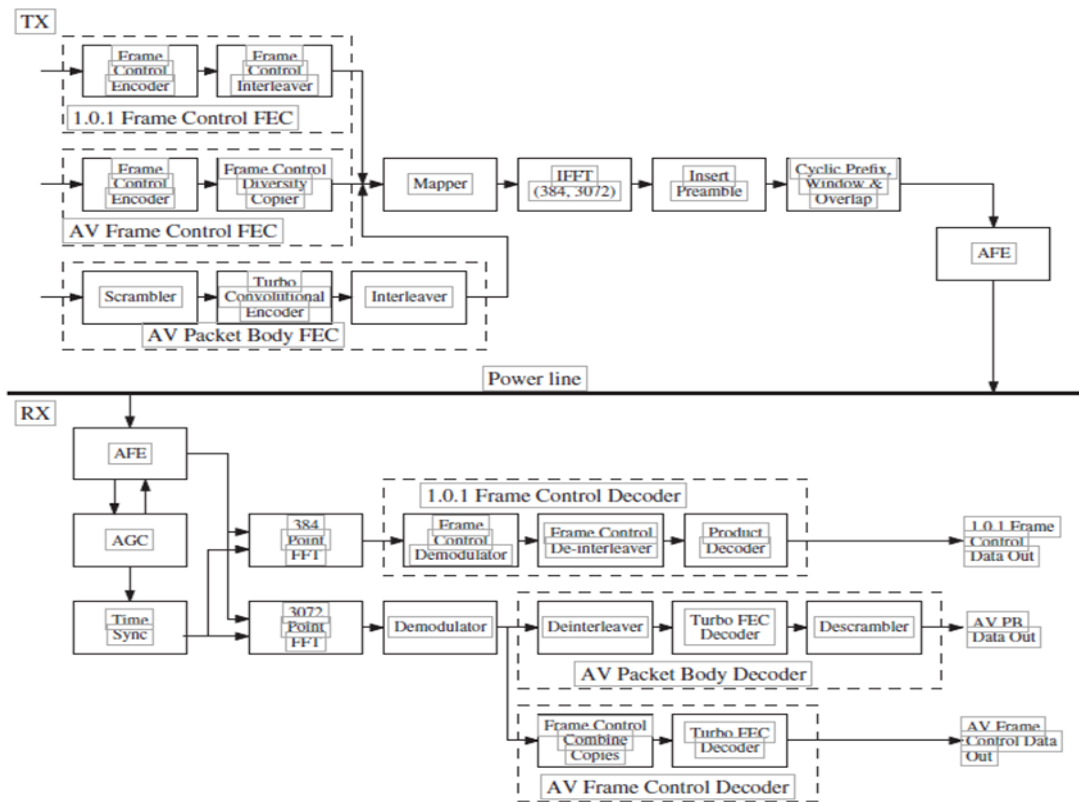
Υπάρχουν δύο PLCP: το O-PLCP που χειρίζεται την αλληλεπίδραση μεταξύ της κοινής MAC και του παραθύρου FFT-OFDM PHY και του W-PLCP που χειρίζεται την αλληλεπίδραση μεταξύ της κοινής MAC και του Wavelet-OFDM PHY. Παράδειγμα λειτουργιών που υπάρχουν σε κάθε στρώμα: Κοινό MAC, μορφές πλαισίων, Διευθυνσιοδότηση, SAP, SAR, Ασφάλεια, IPP / ISP, πρόσβαση σε κανάλια κ.λπ. WEPCP, WCDMA, FEC, κλπ. Ένα άλλο βασικό στοιχείο του προτύπου είναι η παρουσία ενός υποχρεωτικού δια-συστημικού πρωτοκόλλου (ISP) 3 που θα επιτρέπει στις συσκευές PLC με βάση τα πρότυπα IEEE 1901 να μοιράζονται το μέσο αποτελεσματικά και δίκαια ανεξάρτητα από τις διαφορές PHY. Επιπλέον, ο ISP επιτρέπει επίσης τις συσκευές IEEE 1901 να συνυπάρχουν με συσκευές που βασίζονται στο πρότυπο ITU-T G.9960. Ο ISP είναι ένα νέο πρωτόκολλο που είναι μοναδικό για το περιβάλλον PLC [30]. Ο ISP έχει επίσης τυποποιηθεί από την ITU-T ως σύσταση G.9972 [29].

Η απόφαση έχουμε μια λύση πολλαπλών PHY το 1901 δεν είναι η συνέπεια μιας τεχνικής αναγκαιότητας. Υπάρχουν σίγουρα κάποια πλεονεκτήματα στη χρήση είτε των Wavelet είτε των OFDM PHY που βασίζονται σε FFT, αλλά αυτά τα πλεονεκτήματα δεν δικαιολογούν πραγματικά την ανάγκη να συμπεριληφθούν και τα δύο PHY στο πρότυπο. Επομένως, η πολλαπλή φύση PHY του προτύπου IEEE 1901 καταλήγει περισσότερο από μια πολιτική αναγκαιότητα παρά από μια τεχνική. Από την άλλη πλευρά, η απόφαση αυτή θα επιτρέψει επίσης τη συνέχιση και την ομαλή μετάβαση από τις συσκευές που έχουν αναπτυχθεί επί του παρόντος με βάση τις τεχνολογίες HomePlug και Panasonic στις συσκευές IEEE 1901. Ο ISP θα διευκολύνει επίσης τη συνύπαρξη συσκευών IEEE 1901 και ITU-T G.996x, αποφεύγοντας την υποβάθμιση της απόδοσης λόγω των παρεμβολών που θα δημιουργήσουν οι συσκευές που βασίζονται σε αυτά τα δύο μη διαλειτουργικά πρότυπα. Στην πραγματικότητα, αν και η ίδια η έννοια της συνύπαρξης γίνεται αμφισβητήσιμο όταν η βιομηχανία ευθυγραμμίζεται πίσω από μια κοινή τεχνολογία, συμπεριλαμβανομένου του ISP στα τρέχοντα πρότυπα και στα μελλοντικά επόμενη γενιάς είναι ένα μικρό τίμημα από την άποψη της πολυπλοκότητας αν μια μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του προϊόντος μπορεί να προσφέρεται σε τεχνολογίες PLC με βάση τα πρότυπα IEEE 1901 και ITU-T G.996x.

### *6.5.1 IEEE 1901 FFT-OFDM PHY*

#### *6.5.1.1 Επισκόπηση*

Ένα διάγραμμα συνιστωσών ενός πομποδέκτη FFT-OFDM IEEE 1901 φαίνεται στο σχήμα 6.2. Από την πλευρά του πομπού, το επίπεδο PHY λαμβάνει τις εισόδους του από τη στρώση ελέγχου μέσου πρόσβασης (MAC). Υπάρχουν τρεις ξεχωριστές αλυσίδες επεξεργασίας λόγω της διαφορετικής διόρθωσης σφάλματος κωδικοποίησης για το HomePlug 1.0.1 Πληροφορίες Ελέγχου, IEEE 1901 FFT-OFDM Πληροφορίες Ελέγχου, και IEEE 1901 FFT-OFDM. Οι πληροφορίες ελέγχου AV επεξεργάζονται από το πλαίσιο AV Έλεγχος μπλοκ κωδικοποιητή FEC, ο οποίος διαθέτει ένα ενσωματωμένο αντιγραφέα FEC μπλοκ και πολυλειτουργικότητας ενώ η ροή δεδομένων IEEE 1901 FFT-OFDM περνάει μέσω ενός κρυπτογράφου (Scrambler), ενός Turbo FEC Κωδικοποιητή και ένα διαχωριστή καναλιού. Οι πληροφορίες HomePlug 1.0.1 Frame Control (FC) περνούν ένα ξεχωριστό HomePlug 1.0.1 FEC. Οι έξοδοι των τριών κωδικοποιητών FEC οδηγούν σε μια κοινή δομή διαμόρφωσης OFDM, αποτελούμενη από έναν χαρτογράφο, αντίστροφο γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (IFFT) τον επεξεργαστή, την εισαγωγή του προοιμίου (Preamble) και του κυκλικού (Cyclic) προθέματος και την παραθυρική επικάλυψη που τελικά τροφοδοτεί τη μονάδα αναλογικού μπροστινού άκρου (AFE) που συνδέει το σήμα με το μέσο γραμμής ρεύματος.



Σχήμα 6.2 Πομποδέκτης FFT-OFDM IEEE 1901

Στο δέκτη, το AFE λειτουργεί με αυτόματο ελεγκτή κέρδους (AGC) και μονάδα συγχρονισμού χρόνου για την τροφοδοσία ξεχωριστών κυκλωμάτων ελέγχου και ανάκτησης πληροφοριών. Ο έλεγχος πλαισίου ανακτάται με επεξεργασία του λαμβανόμενου δείγματος ροής μέσω ενός FFT 384 σημείων (για τους οριοθέτες HomePlug 1.0.1) και ενός FFT 3072 σημείων (για IEEE 1901 FFT-OFDM) και μέσω ξεχωριστών αποδιαμορφωτών και αποκωδικοποιητών ελέγχου πλαισίου για τις λειτουργίες IEEE 1901 FFT-OFDM και HomePlug 1.0.1. Η ροή δεδομένων που έχει δειγματοληψία (η οποία περιέχει μόνο σύμβολα μορφοποιημένα με FFT-OFDM IEEE 1901) υποβάλλεται σε επεξεργασία μέσω ενός FFT 3072 σημείων, ενός αποδιαμορφωτή με εκτίμηση αναλογίας σήματος προς θόρυβο (SNR), ενός De-interleaver ακολουθούμενου από έναν αποκωδικοποιητή Turbo FEC, και ένα De-scrambler για την ανάκτηση της ροής δεδομένων.

Το IEEE 1901 FFT-OFDM παρέχει μια τάξη μεγέθους βελτίωση της απόδοσης πέρα από το HomePlug 1.0, ενώ ταυτόχρονα αντιμετωπίζει βασικά ζητήματα QoS. Το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης έχει επεκταθεί και η απόσταση υπο - φορέων μειώνεται στο AV. Ενώ το HomePlug 1.0.1 χρησιμοποιεί την περιοχή συχνοτήτων από 4.5 έως 20.7 MHz κβαντισμένη σε 84 subcarriers, ο IEEE 1901 FFT-OFDM λειτουργεί με 1155 φορείς σε εύρος συχνοτήτων 1,8 έως 30 MHz. Ενώ το HomePlug 1.0.1 στην προεπιλεγμένη διαμόρφωσή του χρησιμοποιεί 76 ενεργούς φορείς στο εύρος ζώνης λειτουργίας του, το IEEE 1901 FFT-OFDM

χρησιμοποιεί 917 στην προεπιλεγμένη λειτουργία του, αφού καταγράψει την κάλυψη ορισμένων φορέων για την αποφυγή παρεμβολών [3], [18].

#### 6.5.1.2 Διαμόρφωση φορέα

Στο IEEE 1901 οι φορείς FFT-OFDM μπορούν να διαμορφωθούν με BPSK, QPSK, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM ή 1024-QAM επιτρέποντας έτσι στο σύστημα να επωφεληθεί πλήρως από όλες τις πιθανές περιοχές SNR που μπορεί να συναντήσει ένας συγκεκριμένος φορέας. Το IEEE 1901 FFT-OFDM υποστηρίζει επίσης την φόρτιση bit με ένα πλούσιο μίγμα διαμορφώσεων προσαρμοσμένο για κάθε κανάλι έτσι ώστε κάθε φορέας να επικοινωνεί με την ταχύτερη διαμόρφωση που μπορεί να υποστηρίξει το SNR του μεταφορέα.

#### 6.5.1.3 Ο Έλεγχος του πλαισίου

Το πεδίο ελέγχου πλαισίου AV (FC) αποτελείται από 128 bits πληροφοριών που κωδικοποιούνται και διαμορφώνονται σε ένα σύμβολο OFDM. Το σύμβολο ελέγχου πλαισίου AV έχει ένα διάστημα IFFT 40,96  $\mu$ s και ένα αποτελεσματικό (μη επικαλυπτόμενο) διάστημα φύλαξης (GI) 18,32  $\mu$ s.

Το διάστημα μακράς φύλαξης επιλέχθηκε έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσος όρος χρονικού πεδίου για την αύξηση του λόγου σήματος συμβόλων προς θόρυβο (SNR). Επιπλέον, το πλαίσιο ελέγχου IFFT και το διάστημα προστασίας μεταδίδονται με 0,8 dB υψηλότερη ισχύ από το ωφέλιμο φορτίο, και πάλι για να αυξηθεί η ευρωστία. Καθώς ο κύκλος λειτουργίας του πλαισίου ελέγχου είναι χαμηλός στην τυπική κυκλοφορία, αυτή η επιπλέον ισχύς δεν έχει ως αποτέλεσμα καμία μετρήσιμη επίδραση στις ακτινοβολούμενες εκπομπές.

Τα 128 bits πληροφοριών κωδικοποιούνται με ρυθμό 1/2 χρησιμοποιώντας τη μηχανή συνελκτικού κώδικα για την παραγωγή 256 κωδικοποιημένων δυαδικών ψηφίων. Αυτά τα 256 δυαδικά ψηφία παρεμβάλλονται και στη συνέχεια τίθενται μέσω ενός εξωτερικού κώδικα επανάληψης που αντιγράφει κάθε κομμάτι όσες φορές είναι δυνατόν και τα δυαδικά ψηφία χαρτογραφούνται πάνω στο σύμβολο ελέγχου πλαισίου με μέγιστη διάδοση για την ποικιλία χρόνου και συχνότητας.

Ο FC περιέχει πληροφορίες που χρειάζονται τόσο από το PHY όσο και από το MAC. Τα περιεχόμενα που σχετίζονται με PHY αποτελούνται από τον τύπο οριοθέτησης, τον αναγνωριστικό χάρτη τόνων (TMI) και το μήκος του σώματος PHY. Απαιτείται ο τύπος διαχωρισμού για την αποκωδικοποίηση FC και το TMI απαιτείται για την αποδιαμόρφωση του σώματος PHY, εάν υπάρχει. Το TMI είναι απλώς ένας δείκτης εννέα δυαδικών ψηφίων ο οποίος υποδεικνύει ποιο χάρτη τόνων ο πομπός χρησιμοποιεί για τη ρύθμιση των συμβόλων OFDM του σώματος PHY. Επιλέγεται από τον δέκτη κατά την προσαρμογή του καναλιού και αποστέλλεται μαζί με τον Χάρτη τόνου στον πομπό. Το PHY μήκος σώματος απαιτείται από το

PHY για να μάθουμε πόσα σύμβολα αποδιαμορφώνουμε. Οι πληροφορίες σχετικά με το μήκος του σώματος PHY χρειάζονται επίσης από το MAC για Virtual Carrier Sense (VCS). Όπως και στις ασύρματες επικοινωνίες, η εξασθένιση και ο θόρυβος είναι υψηλές στο κανάλι PLC, οπότε το Physical Carrier Sense (PCS) περιορίζεται στην ανίχνευση συγχρονισμού. Το VCS επιτρέπει στους σταθμούς να αποφεύγουν την πρόσβαση στο μέσο ενώ ένας άλλος σταθμός μεταδίδει, ιδιαίτερα σε λειτουργία πρόσβασης CSMA / CA.

#### 6.5.1.4 Payload

Το σήμα χρονικής περιοχής OFDM, με βάση ένα ρολόι συστήματος 75 MHz, προσδιορίζεται ως εξής. Για τα σύμβολα δεδομένων, ένα σύνολο σημείων δεδομένων από το μπλοκ χαρτογράφησης διαμορφώνεται στις κυματομορφές του δευτερεύοντος φορέα χρησιμοποιώντας IFFT 3072 σημείων με αποτέλεσμα 3072 δείγματα χρόνου (που αναφέρονται ως το διάστημα IFFT). Ένας σταθερός αριθμός δειγμάτων από το τέλος του IFFT εισάγεται σαν ένα κυκλικό πρόθεμα στο μπροστινό μέρος του διαστήματος IFFT, για να δημιουργηθεί ένα εκτεταμένο σύμβολο OFDM.

#### 6.5.1.5 IEEE 1901 FFT-OFDM Βελτιστοποίηση του HomePlug AV 1.1

Το IEEE 1901 FFT αποτελεί επέκταση της προδιαγραφής HomePlug AV 1.1. Οι επεκτάσεις έγιναν με τέτοιο τρόπο ώστε τα συστήματα FFT-OFDM IEEE 1901 να μπορούν να συνυπάρχουν με το ήδη υπάρχον σύστημα HomePlug AV ενώ παρέχουν υψηλότερες επιδόσεις. Οι ακόλουθες ενότητες παρέχουν μια επισκόπηση των τεχνικών προδιαγραφών για αυτές τις βελτιώσεις.

##### 6.5.1.5.1 Περιοχή συχνότητας 30-50 MHz

Το Physical layer HomePlug AV λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων 1.8-30 MHz χρησιμοποιώντας μόνο 917 από τους διαθέσιμους 1155 φορείς στη ζώνη 1.8-30 MHz και οι υπόλοιποι φορείς καλύπτονται (δηλ. Δεν χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων). Στο IEEE 1901 FFT-OFDM έγιναν οι ακόλουθες δύο επεκτάσεις στη ζώνη συχνοτήτων:

(α) Η ζώνη συχνοτήτων επεκτάθηκε μέχρι τα 50 MHz. Η απόσταση μεταξύ φορέων στα 30 MHz-50 MHz είναι ίδια με αυτή στη ζώνη των 1,8-30 MHz (δηλαδή 24,414 kHz).

(β) Οι καλυπτόμενοι φορείς στο 1,8-30 ήταν επίσης διαθέσιμοι για τη μετάδοση δεδομένων.

Αυτές οι δύο επεκτάσεις επιτρέπουν συστήματα IEEE 1901 FFT-OFDM που χρησιμοποιούν τη ζώνη των 1,8 MHz-50 MHz για να υποστηρίξουν έως και 1974 φορείς (δηλ.  $(50-1,8) * 1000 / 24,414$ ). Αυτοί οι πρόσθετοι φορείς μαζί με κωδικοποιητή 16/18 και χρονικό διάστημα προστασίας 1,6 μs επιτρέπουν στα συστήματα FFT-OFDM IEEE 1901 να παρέχουν μέγιστη ταχύτητα δεδομένων PHY 500 Mbps  $(1974 * 12 * (16/18) / (40,96 + 1,6))$ .



#### 6.5.1.6 Πρόσθετα διαστήματα ασφάλειας

Το φυσικό στρώμα HomePlug AV χρησιμοποιεί ένα διάστημα διατήρησης 7.56 μs για τα δύο πρώτα σύμβολα OFDM του ωφέλιμου φορτίου PPDU. Το IEEE 1901 FFT-OFDM επιτρέπει στο διάστημα ασφαλείας των δύο πρώτων συμβόλων OFDM να είναι 7.56 μs ή 19.56 μs. Τα εσωτερικά δίκτυα περιορίζονται στο διάστημα προστασίας των 7,56 μs στα δύο πρώτα σύμβολα OFDM, διατηρώντας έτσι τη συμβατότητα με το HomePlug AV.

Το HomePlug AV PHY περιορίζει το διάστημα προστασίας στο τρίτο και υψηλότερο σύμβολο OFDM στο ωφέλιμο φορτίο PPDU είτε σε 5,56 μs είτε σε 7,56 μs. Ο δέκτης επιλέγει το διάστημα προστασίας που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί βάσει των συνθηκών του καναλιού και το υποδεικνύει στον πομπό ως μέρος της προσαρμογής του καναλιού. Το IEEE 1901 FFT-OFDM επεκτείνει τον αριθμό των διαστημάτων φρουράς επιτρέποντας εκτεταμένα μικρότερα διαστήματα φρουράς και εκτεταμένα μεγαλύτερα διαστήματα φρουράς:

- Τα παρατεταμένα μικρότερα διαστήματα φρουράς επιτρέπουν τη στήριξη των διαστημάτων φρουρών {1.60, 3.92, 2.08 και 2.56} μs. Αυτά επιτρέπουν στους σταθμούς IEEE 1901 FFT-OFDM να βελτιώνουν την αποδοτικότητα σε κανάλια με κανάλια χαμηλής καθυστέρησης.

- Τα εκτεταμένα μεγαλύτερα διαστήματα φρουράς επιτρέπουν τη στήριξη των {9.56, 11.56, 15.56 και 19.56} μs διαστημάτων ελέγχου. Αυτά προορίζονται κυρίως για χρήση σε μεγάλα κανάλια καθυστέρησης (π.χ. σε δίκτυα Access).

Οι σταθμοί υποδεικνύουν την υποστήριξή τους για αυτά τα εκτεταμένα διαστήματα φρουρών, ρυθμίζοντας το Flag ESGISF (Extended Smaller Guard Interval Support Flag) και την επέκταση της σημαίας ESGISF (Larger Guard Interval Support Flag στο στοιχείο ελέγχου πλαισίου ήχου MPDU). Οι δέκτες χρησιμοποιούν αυτές τις πληροφορίες για τον προσδιορισμό του χρονικού διαστήματος του τόνου χάρτου βάσει των συνθηκών του καναλιού και των δυνατοτήτων του διαστήματος φρουράς του πομπού.

#### 6.5.1.7 4096-QAM

Η υψηλότερη διαμόρφωση που υποστηρίζεται από το HomePlug AV είναι 1024-QAM. Στο IEEE 1901 FFT-OFDM, προστέθηκε προαιρετική υποστήριξη για 4096-QAM για να βελτιώσει την απόδοση σε κανάλια υψηλού SNR. Οι σταθμοί υποδεικνύουν την υποστήριξή τους για το 4096-QAM θέτοντας το πεδίο Extended Modulation Support (EMS) στο Sound Control MPDU Frame. Οι δέκτες χρησιμοποιούν αυτές τις πληροφορίες για να καθορίσουν τη διαμόρφωση σε κάθε φορέα του χάρτου τόνων βάσει των συνθηκών του καναλιού και των ικανοτήτων του δέκτη.

### 6.5.1.8 Ρυθμός κώδικα 16/18

Το HomePlug AV υποστηρίζει συντελεστές κωδικών FEC 1/2 και 16/21. Στο IEEE 1901 FFT-OFDM, προστέθηκε υποστήριξη για ρυθμό κώδικα 16/18 για να βελτιώσει την απόδοση σε υψηλότερα κανάλια SNR. Ο κώδικας 16/18 FEC χρησιμοποιεί ένα σχήμα κωδικοποίησης παρόμοιο με τον Turbo Convolutional Encoder για τους συντελεστές εξόδου 1/2 και 16/21. Ωστόσο, το μοτίβο διάτρησης τροποποιείται για να μειώσει την πλεονασμό και να αυξήσει τον ρυθμό κωδικοποίησης.

Οι σταθμοί υποδεικνύουν την υποστήριξή τους για ρυθμό κωδικών 16/18, ρυθμίζοντας το πεδίο Υποστήριξη αυξημένης συχνότητας FEC (EFRS) στο Sound Control MPDU Frame. Οι δέκτες χρησιμοποιούν αυτές τις πληροφορίες για να καθορίσουν τον ρυθμό κωδικών FEC για τον χάρτη τόνων βάσει των συνθηκών του καναλιού και των δυνατοτήτων του δέκτη.

### 6.5.2 IEEE 1901 Wavelet-OFDM PHY

Το Wavelet-OFDM είναι η δεύτερη τεχνική μετάδοσης πολλαπλών καναλιών που περιέχεται στο πρότυπο IEEE 1901. Το θεμελιώδες χαρακτηριστικό του Wavelet-OFDM είναι ότι ο συνήθης μετασχηματισμός με βάση το FFT και το παράθυρο ορθογωνίας / ανυψωμένης συνημιτότητας που χρησιμοποιείται στο συμβατικό OFDM αντικαθίστανται από κρίσιμα αποδεκατισμένα τέλει ανακατασκευής συνημιτονοειδούς διαμορφωσης φίλτρα που παρουσιάζουν διάφορες επιθυμητές ιδιότητες όπως πολύ χαμηλή φασματική διαρροή. Μία από τις πιο ενδιαφέρουσες πτυχές του Wavelet-OFDM είναι ότι δεν είναι απαραίτητο να εισαχθεί ένα διάστημα προστασίας μεταξύ διαδοχικών συμβόλων. Υπάρχει εκτεταμένη βιβλιογραφία σχετικά με το Wavelet-OFDM.

Το σύστημα Wavelet-OFDM τοποθετεί 512 ομοιόμορφα χωρισμένους φορείς στη ζώνη συχνοτήτων από DC σε περίπου 30 MHz. Από αυτούς τους 512 φορείς, 338 από αυτούς (περίπου 2 MHz έως 28 MHz) χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά πληροφοριών. Με τη χρήση μιας προαιρετικής ζώνης μέχρι 50 MHz, μπορούν να επιτευχθούν μέγιστοι ρυθμοί PHY της τάξεως των μισών Gbps. Κάθε φορέας φορτώνεται με πραγματικές διαμορφώσεις όπως το M-PAM ( $M = 2, 4, 8, 16, 32$ ). Είναι σημαντικό να επισημάνουμε ότι το γεγονός ότι το Wavelet-OFDM χρησιμοποιεί πραγματικές διαμορφώσεις δεν σημαίνει ότι το Wavelet-OFDM έχει χαμηλότερη φασματική απόδοση από το συμβατικό FFT-OFDM που χρησιμοποιεί 2D διαμορφώσεις όπως το QAM. Στην πραγματικότητα, η ανάλυση συχνότητας του Wavelet-OFDM είναι διπλάσια από την παράθυρο OFDM, επειδή η χρήση μη ορθογώνιου παραθύρου επιτρέπει υψηλότερο βαθμό φασματικής επικάλυψης. Κατά συνέπεια, για το ίδιο συνολικό εύρος ζώνης και τον ίδιο αριθμό σημείων μετασχηματισμού  $K$ , το Wavelet-OFDM χρησιμοποιεί  $K$  πραγματικούς φορείς που χρησιμοποιούν PAM ενώ OFDM χρησιμοποιεί  $K / 2$  πολύπλοκους

φορείς που χρησιμοποιούν QAM. Επομένως, το OFDM και το Wavelet-OFDM έχουν την ίδια φασματική απόδοση. Τα συγκεκριμένα FEC περιλαμβάνουν ένα υποχρεωτικό σύμπλοκο σχήμα Reed-Solomon / συνελκτικό κώδικα και έναν προαιρετικό συνελκτικό κώδικα LDPC που επιτρέπει την εύκολη κλιμάκωση σε υψηλά ποσοστά δεδομένων σε λογική πολυπλοκότητα.

### 6.5.3 Το MAC και τα δύο PLCP

Η αρχιτεκτονική layer IEEE 1901 MAC που χρησιμοποιείται για τον συντονισμό του δικτύου IEEE 1901 είναι Master / Slave. Το Master (QoS Controller) εξουσιοδοτεί και επικυρώνει τους υποτελείς σταθμούς στο δίκτυο και μπορεί να εκχωρεί χρονικές θυρίδες για εκπομπές χρησιμοποιώντας είτε πρόσβαση CSMA είτε TDM. Οι σταθμοί δικτύου μπορούν να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους (σε αντίθεση με ένα σημείο πρόσβασης που αναμεταδίδει όλη την κίνηση). Αυτό αυξάνει την απόδοση του δικτύου και μειώνει το φορτίο στο Master.

Το στρώμα MAC χρησιμοποιεί έναν υβριδικό έλεγχο πρόσβασης που βασίζεται σε TDMA και CSMA / CA, ορίζοντας μια ελεύθερη περίοδο συγκρούσεων (CFP) και μια περίοδο συγκράτησης (CP) για την προσαρμογή δεδομένων με διαφορετικές απαιτήσεις μετάδοσης. Το CFP είναι ένα μέρος του συνολικού κύκλου μετάδοσης κατά το οποίο οι σταθμοί που έχουν απαιτήσεις χαμηλής καθυστέρησης / χαμηλής αναταραχής επιτρέπονται αποκλειστικά για χρήση του μέσου. Όλες τις ροές που απαιτούν μετάδοση στην CFP διαχειρίζεται ένας ελεγκτής QoS. Η CFP ξεκινάει με έναν Beacon, ο οποίος αποστέλλεται περιοδικά από τον ελεγκτή QoS και τελειώνει όταν μεταφέρονται όλες οι δεσμευμένες ροές. Ο υπόλοιπος κύκλος Beacon χρησιμοποιείται για CP. Στη CFP μεταφέρονται ροές δεδομένων που έχουν χρόνο που τους διατίθεται μέσω διαδικασίας κράτησης εύρους ζώνης που διαχειρίζεται ο ελεγκτής QoS.

Η πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDM) μπορεί επίσης να υποστηριχθεί για να επιτρέψει τη συνύπαρξη μεταξύ των οικιακών δικτύων και των δικτύων πρόσβασης. Η υποστήριξη κατακερματισμού, η έκρηξη δεδομένων, η ομάδα-ACK και η επιλεκτική επανάληψη ARQ είναι επίσης σημαντικά χαρακτηριστικά που υποστηρίζονται στο IEEE 1901.

Το ευφύες TDMA ορίζεται επίσης στο IEEE 1901. Το ευφύες TDMA είναι ένας δυναμικός μηχανισμός κατανομής εύρους ζώνης που εκμεταλλεύεται πληροφορίες σχετικά με την ποσότητα της κυκλοφορίας που βρίσκεται σε ουρά σε κάθε σταθμό μετάδοσης. Αυτός ο μηχανισμός πραγματοποιεί σταθερή μετάδοση που μπορεί να αντιμετωπίσει σφάλματα και κυκλοφορία IP / VBR. Σε κάθε μεταδιδόμενο πακέτο δεδομένων, κάθε σταθμός εισάγει τον αριθμό των πλαισίων που πρόκειται να μεταδοθούν. Δεδομένου ότι οι πληροφορίες κυκλοφορίας λαμβάνονται απευθείας από πακέτα δεδομένων, ο ελεγκτής QoS μπορεί να πραγματοποιήσει ακριβή λειτουργία σε πραγματικό χρόνο. Υπάρχει επίσης μια επιλογή για συγχρονισμό κύκλου γραμμής για την αντιμετώπιση του περιοδικά μεταβαλλόμενου χρόνου

καναλιού και του κυκλοστατικού θορύβου.

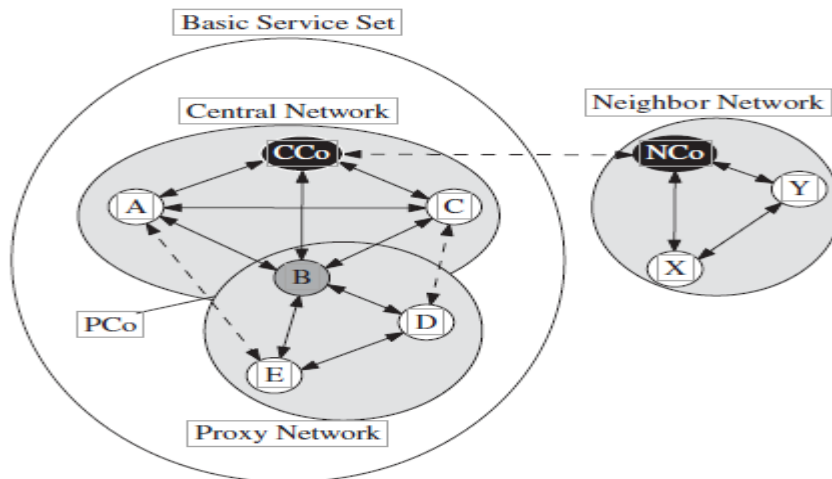
Στην επόμενη ενότητα θα δοθούν μόνο οι λεπτομέρειες του πρωτοκόλλου σύγκλισης φυσικής στρώσης (PLCP) που περιγράφουν τη διεπαφή MAC-PHY για το IEEE 1901 FFT-OFDM PLCP. Για λεπτομέρειες σχετικά με το IEEE 1901 Wavelet-OFDM PLCP, δείτε [32].

#### 6.5.4 IEEE 1901 FFT-OFDM Έλεγχος Πρόσβασης Μέσου (MAC)

Για να υποστηρίξει τις εφαρμογές πολυμέσων, το πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης πολυμέσων του PLC (MAC) πρέπει να λειτουργεί σε στενό συντονισμό με τις υπηρεσίες PHY, προκειμένου να παρέχει εγγυήσεις QoS και εύρους ζώνης, παρουσία περιορισμένων και χρονικά μεταβαλλόμενων πόρων δικτύου στο κανάλι PLC. Το IEEE 1901 FFT-OFDM MAC που περιγράφεται στη συνέχεια, αντιμετωπίζει αυτές τις προκλήσεις.

##### 6.5.4.1 Αρχιτεκτονική Δικτύου

Από την προοπτική ελέγχου μέσου πρόσβασης, ένα δίκτυο IEEE 1901 FFT-OFDM PLC συνίσταται από ένα σύνολο σταθμών HomePlug συνδεδεμένων στη γραμμή εναλλασσόμενου ρεύματος, οι σταθμοί στο ίδιο λογικό δίκτυο απομονώνονται κρυπτογραφικά χρησιμοποιώντας κρυπτογράφηση AES δικτύου 128 bit Το κλειδί (NEK) σχηματίζει έτσι ένα AV Logical Network (AVLN). Κάθε AVLN διοικείται από ένα μόνο σταθμό ελέγχου που ονομάζεται κεντρικός συντονιστής Central Coordinator (CCo).



Σχήμα 6.3 Αρχιτεκτονική δικτύου FFT-OFDM IEEE 1901.

Το CCo εκτελεί λειτουργίες διαχείρισης δικτύου όπως

- α) σύνδεση νέων σταθμών που συνδέονται με το AVLN ·
- β) επικύρωση νέων σταθμών που συνδέονται με το AVLN ·
- γ) έλεγχος εισαγωγής για συνεδρίες TDMA ·

δ) τον προγραμματισμό των κατανομών TDMA και CSMA κατά τη διάρκεια κάθε περιόδου Beacon.

Το σχήμα 6.3 δείχνει την οργάνωση των συσκευών IEEE 1901 FFT-OFDM σε

διαφορετικές κατηγορίες δικτύων. Το CCo και οι συσκευές στο λογικό δίκτυο που μπορούν να επικοινωνούν απευθείας μαζί του αποτελούν το Κεντρικό Δίκτυο (CN). Τα χαρακτηριστικά εξασθένισης και θορύβου στο κανάλι ηλεκτρικής γραμμής ενδέχεται να προκαλέσουν καταστάσεις όπου ορισμένες συσκευές που ανήκουν στο ίδιο οικιακό δίκτυο ενδέχεται να μην είναι σε θέση να επικοινωνούν με το CCo. Ένα δίκτυο μεσολάβησης Proxy Network (PN) δημιουργείται από το CCo σε τέτοια σενάρια για να του επιτρέψει να ελέγχει τους κρυφούς σταθμούς (HSTAs) μεταφέροντας μηνύματα μέσω ενός Συντονιστή Proxy (PCo). Σημειώστε ότι οι άμεσες επικοινωνίες από ομότιμους χρήστες εξακολουθούν να είναι ενεργοποιημένες μεταξύ των HSTA και των συσκευών CN με τις οποίες συνδέεται το PN τους. Η προσέγγιση PN βελτιώνει την κάλυψη, αν και τα δίκτυα μεσολάβησης είναι πολύ σπάνια λόγω της ισχυρής φυσικής στρώσης που χρησιμοποιείται από το IEEE 1901 FFT-OFDM.

#### 6.5.4.2 Τρόποι λειτουργίας δικτύου

Ο τρόπος λειτουργίας ενός δικτύου AV εξαρτάται από το αν μπορούν να ανιχνευθούν τα γειτονικά δίκτυα. Το CCo κάθε AVLN διατηρεί μια λίστα παρεμβολών δικτύου (INL). Το INL είναι ο κατάλογος των AVLN των οποίων οι σημάσεις μπορούν να ανιχνευθούν απευθείας από το CCo. Στον γειτονικό συντονισμό δικτύου, ένα AVLN απαιτείται να συντονιστεί μόνο με τα AVLN στο INL του. Κατά συνέπεια, δεν υπάρχει αλυσιδωτή επίδραση όπου ένα AVLN πρέπει να συντονιστεί με τα πολλαπλά βήματα AVLNs μακριά [33]. Ένα AVLN μπορεί να λειτουργεί σε μία από τις δύο λειτουργίες:

- (α) Μη συντονισμένη (αυτόνομη) λειτουργία, ή
- (β) Συντονισμένη λειτουργία.

Ένα AVLN λειτουργεί σε ασυντόνιστη λειτουργία αν δεν μπορεί να ανιχνεύσει αξιόπιστους σηματοδότες (δηλ. Όταν το INL είναι κενό). Αυτό μπορεί να συμβεί επειδή δεν υπάρχουν υπάρχοντα δίκτυα κοντά στο AVLN ή επειδή το CCo δεν μπορεί να εντοπίσει τους σηματοδότες των υφιστάμενων δικτύων. Ένα σύστημα AVLN που λειτουργεί σε ασυνόδευτη λειτουργία θα δημιουργήσει και θα διατηρήσει το δικό του χρονικό διάστημα σηματοδότησης.

Ένα σύστημα AVLN λειτουργεί σε Συντονισμένη λειτουργία εάν το CCo του εντοπίζει αξιόπιστα τους σηματοδότες από τουλάχιστον ένα υπάρχον AVLN. Σε συντονισμένη λειτουργία, ένα AVLN μοιράζεται την Περίοδο Beacon με όλα τα AVLN στο INL του. Η Περιοχή Beacon περιλαμβάνει πολλαπλές υποδοχές σηματοδοτών και κάθε AVLN μεταδίδει τις σηματοδοσίες του σε μια καθορισμένη υποδοχή σηματοδότη μία φορά κάθε περίοδο Beacon. Συνήθως, δύο AVLNs σε κάθε άλλο INL θα μοιράζονται έναν κοινό χρόνο έναρξης για τις περιόδους σηματοδοσίας.

#### 6.5.4.3 Σχεδιασμός *Cross Layer MAC / PHY* για πολυμέσα

Το IEEE 1901 FFT-OFDM χρησιμοποιεί ένα υψηλό επίπεδο διασταυρούμενου στρώματος MAC-PHY για να αντιμετωπίσει τα μοναδικά χαρακτηριστικά των καναλιών γραμμής ισχύος ενώ παρέχει εγγυήσεις QoS για κυκλοφορία πολυμέσων. Σημαντικές πτυχές του σχεδιασμού σταυρωτής στρώσης FFT-OFDM MAC-PHY IEEE 1901 είναι:

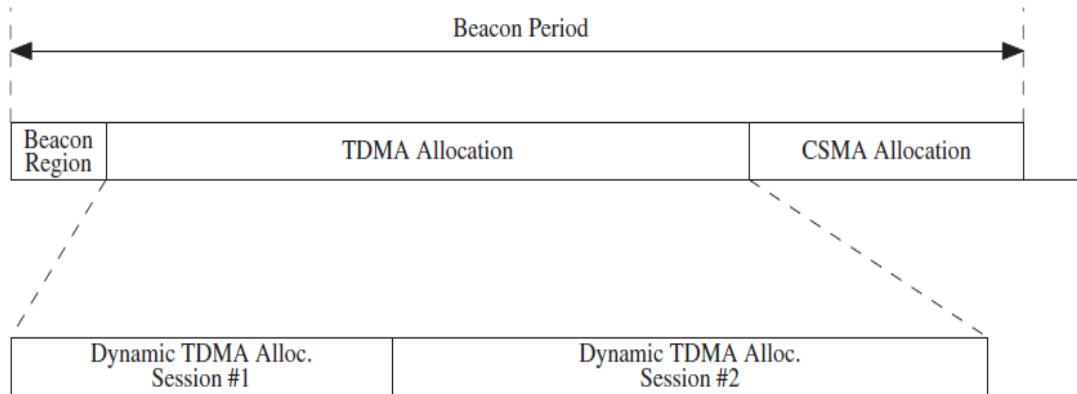
- (α) Αποδοτική MAC πλαισίωση για να ξεπεραστεί ο θόρυβος του παλμού,
- β) προσαρμογή του καναλιού με βάση τον κύκλο AC [34], και
- (γ) Δυναμική TDMA για να χειριστεί τις μεταβαλλόμενες συνθήκες του καναλιού.

Ο θόρυβος παλμού είναι η συνηθέστερη βλάβη σε γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας [1], [2]. Διαχειρίζεται το IEEE 1901 FFT-OFDM με συνδυασμό επιθετικής προσαρμογής καναλιών στο επίπεδο PHY και αποτελεσματικής αναμετάδοσης σε επίπεδο MAC. Η ισχύς θορύβου παλμού είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από την ισχύ εξόδου σήματος και είναι ευρύ φάσμα, οπότε θα διαταράξει σοβαρά ένα ή περισσότερα σύμβολα PHY ανά συμβάν. Η προσαρμογή του καναλιού στο επίπεδο PHY για την υπέρβαση αυτής της μορφής βλάβης θα υποβαθμίσει σημαντικά τον ρυθμό δεδομένων και μπορεί απλά να μην είναι εφικτός. Δεδομένου ότι συχνά υπάρχουν αρκετά αδιάσπαστα σύμβολα μεταξύ των γεγονότων, η προσαρμογή στην υψηλότερη συχνότητα που αυτά τα καλά σύμβολα θα υποστηρίξουν παρέχει καλύτερη καθαρή απόδοση. Ωστόσο, αυτό εξαρτάται από την ικανότητα να επαναμεταδίδει αποτελεσματικά μόνο τα κακά κατεστραμμένα τμήματα κάθε πλαισίου δεδομένων, το οποίο πραγματοποιείται με μια νέα μέθοδο πλαισίωσης MAC δύο επιπέδων με επιλεκτικές απολαβές επιπέδου πλαισίου.

Ο θόρυβος στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ποικίλλει ανάλογα με τον κύκλο γραμμής AC. Για παράδειγμα, τα επίπεδα θορύβου στα μηδενικά διαστήματα μπορεί να είναι πολύ χαμηλά σε σύγκριση με τον θόρυβο στις κορυφές. Πολλές πηγές θορύβου παλμού είναι συγχρονισμένες με τον κύκλο γραμμής (π.χ. διμερή) προκαλώντας ακόμη μεγαλύτερες περιοδικές επιπτώσεις θορύβου [1], [2]. Ο επιτεύξιμος ρυθμός PHY στο καθαρότερο τμήμα του κύκλου της γραμμής μπορεί να είναι περισσότερο από 50% υψηλότερος από εκείνον του θορυβώδους τμήματος. Οι δομές MAC χρησιμοποιούνται στο IEEE 1901 FFT-OFDM για να διευκολύνεται η προσαρμογή του καναλιού που είναι συγχρονισμένη με τον υποκείμενο κύκλο γραμμής εναλλασσόμενου ρεύματος, οπότε χειρίζεται κατάλληλα ο κυκλοστατικός θόρυβος.

Τα χαρακτηριστικά καναλιού γραμμής ισχύος μπορούν επίσης να αλλάξουν όταν ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται οι ηλεκτρικές συσκευές. Αυτό μπορεί να προκαλέσει μια κατανομή που κάποτε αρκεί για να μην ικανοποιεί τις απαιτήσεις διεκπεραίωσης μιας συγκεκριμένης εφαρμογής. Για να εξασφαλιστεί ότι οι εγγυήσεις QoS διατηρούνται υπό αυτές τις συνθήκες, οι κατανομές IEEE 1901 FFT-OFDM TDMA είναι δυναμικές. Οι σύντομες

προθεσμίες παράδοσης (π.χ. 100 ms) απαιτούν πολύ γρήγορη ανακατανομή προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις ανοχής απώλειας πακέτων.



Σχήμα 6.4 Περίοδος δομής Beacon.

#### 6.5.4.4 Έλεγχος πρόσβασης καναλιού

##### 6.5.4.4.1 Δομή περιόδου Beacon σε μη συντονισμένη λειτουργία

Η δομή της Περιόδου Beacon αποτελείται από μια Περιοχή Beacon ακολουθούμενη από τις Περιοχές TDMA και CSMA (Εικόνα 6.4). Η Περιοχή Beacon περιέχει το Beacon που μεταδίδεται από το CCo. Κάθε Beacon αποτελείται από ένα προοίμιο, πλαίσιο ελέγχου και ωφέλιμο φορτίο 136 byte. Οι πληροφορίες κατανομής μεταδίδονται στο ωφέλιμο φορτίο Beacon χρησιμοποιώντας το "mini-ROBO", μία από τις μεθόδους δυναμικής διαμόρφωσης που περιγράφηκαν προηγουμένως.

Οι κατανομές TDMA παρέχονται για ροές που απαιτούν QoS. Ακολουθούν τη διαδικασία ρύθμισης σύνδεσης, κατά την οποία διαπραγματεύονται τις απαιτήσεις κατανομής. Οι κατανομές TDMA στο IEEE 1901 FFT-OFDM είναι δυναμικές. Οι περίοδοι σύνδεσης με την κατανομή TDMA ενημερώνουν συνεχώς το CCo με τις απαιτήσεις κατανομής τους, επιτρέποντας στο CCo να ενημερώνει ταχέως τις χορηγήσεις, καθώς μεταβάλλονται οι συνθήκες του καναλιού ή οι ρυθμοί πηγής.

Οι κατανομές του CSMA στην περίοδο Beacon χρησιμοποιούνται από την κίνηση χωρίς σύνδεση και από συνδέσεις που δεν έχουν αυστηρές απαιτήσεις QoS. Το IEEE 1901 FFT-OFDM χρησιμοποιεί τον ίδιο μηχανισμό πρόσβασης στο κανάλι CSMA με το HomePlug 1.0.

Οι ροές που απαιτούν QoS περνούν από μια διαδικασία εγκατάστασης σύνδεσης για να διασφαλίσουν ότι οι πόροι δικτύου και σταθμών είναι διαθέσιμοι για να υποστηρίξουν τη σύνδεση. Τα αιτήματα σύνδεσης μπορούν να ξεκινήσουν είτε από την εφαρμογή είτε από την αυτόματη σύνδεση στο επίπεδο σύγκλισης. Τα αιτήματα σύνδεσης περιλαμβάνουν μια προδιαγραφή σύνδεσης (CSPEC) που περιέχει χαρακτηριστικά κυκλοφορίας και απαιτήσεις

QoS. Στο πλαίσιο του σταθμού IEEE 1901 FFT-OFDM, ο «Διαχειριστής συνδέσεων» (CM) χειρίζεται αυτά τα αιτήματα. Η ρύθμιση σύνδεσης χωρίζεται σε δύο στάδια. Κατ' αρχάς, ο Διαχειριστής σύνδεσης που εκκινεί τη σύνδεση επικοινωνεί με το CM στο άλλο άκρο της επιθυμητής σύνδεσης για να προσδιορίσει εάν υπάρχουν επαρκείς πόροι στον προορισμό για να χειριστεί τη νέα σύνδεση. Εάν η πηγή ή ο προορισμός δεν διαθέτει πόρους, η σύνδεση αποτυγχάνει και η εφαρμογή ειδοποιείται. Διαφορετικά, ο CM στην πηγή επικοινωνεί με το CCo, το οποίο εκτελεί τον έλεγχο εισαγωγής κλήσεων. Εάν υπάρχουν επαρκείς πόροι δικτύου, ο CCo δέχεται τη νέα σύνδεση και του παρέχει ένα αναγνωριστικό σύνδεσης (LID), το οποίο χρησιμοποιείται για την παροχή πόρων που έχουν κατανεμηθεί μέσα στο δίκτυο AV.

#### 6.5.4.4.2 Δομή περιόδου φάσης σε συντονισμένη λειτουργία

Η δομή της Περιόδου Beacon σε Συντονισμένη Λειτουργία είναι ελαφρώς πιο περίπλοκη από αυτή της ασυντόνιστης λειτουργίας. Σε περίπτωση μη συντονισμένης λειτουργίας, το CCo του AVLN έχει πλήρη έλεγχο σε ολόκληρη την Περίοδο Beacon. Έτσι, μπορεί να αποφασίσει αυτόνομα τις τοποθεσίες των δωρεάν κατανομών και των κατανομών του CSMA. Σε Συντονισμένη Λειτουργία, όμως, ένα AVLN πρέπει πρώτα να «κρατήσει» ένα μέρος της Περιόδου Beacon από τα AVLNs στο INL του, προτού να μπορέσει να προγραμματίσει τις δωρεάν κατανομές. Επομένως, όλα τα AVLN στο INL θα απέχουν από τη μετάδοση στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ένα χρονικό διάστημα μοιράζεται από όλα τα AVLN για κυκλοφορία CSMA.

#### 6.5.4.4.3 Συντονισμός γειτονικών δικτύων.

Ο στόχος του συντονισμού του γειτονικού Δικτύου είναι να εξασφαλίσει ότι κάθε AVLN και το INL του καθορίζουν μια συνεπή δομή Περιόδου Beacon. Κάθε CCo θα πρέπει να ανακαλύψει τις δομές του Beacon Period όλων των AVLNs στο INL του και να υπολογίσει ένα ενιαίο 'ενοποιημένο' πρόγραμμα όλων των παρεμβαλλόμενων AVLNs. Από αυτό το ενοποιημένο πρόγραμμα του INL, το CCo μπορεί να επιλέξει μια σταθερή δομή Περίοδο Beacon, την οποία μεταδίδει στο σηματοδότη του. Μια CCo ανταλλάσσει μηνύματα (αίτημα, απάντηση και επιβεβαίωση) με το γείτονα CCos (NCos) στο INL της για να ζητήσει νέες περιοχές που έχουν δεσμευτεί. Το CCo στέλνει πρώτα ένα αίτημα σε όλα τα NCos που καθορίζουν τα χρονικά διαστήματα που θέλει να χρησιμοποιήσει το CCo ως τις νέες προορισμένες περιοχές του. Κάθε NCo θα στείλει μια απάντηση στο CCo. Εάν όλες οι απαντήσεις υποδεικνύουν ότι το αίτημα είναι αποδεκτό, τότε το CCo θα στείλει ένα θετικό μήνυμα επιβεβαίωσης σε όλα τα NCos, θα ενημερώσει τη δομή της Περιόδου Beacon για να συμπεριλάβει τις νέες Περιοχές που έχουν δεσμευτεί και θα αρχίσει να τις χρησιμοποιεί.

#### 6.5.4.5 Δραστηριότητα μέσου

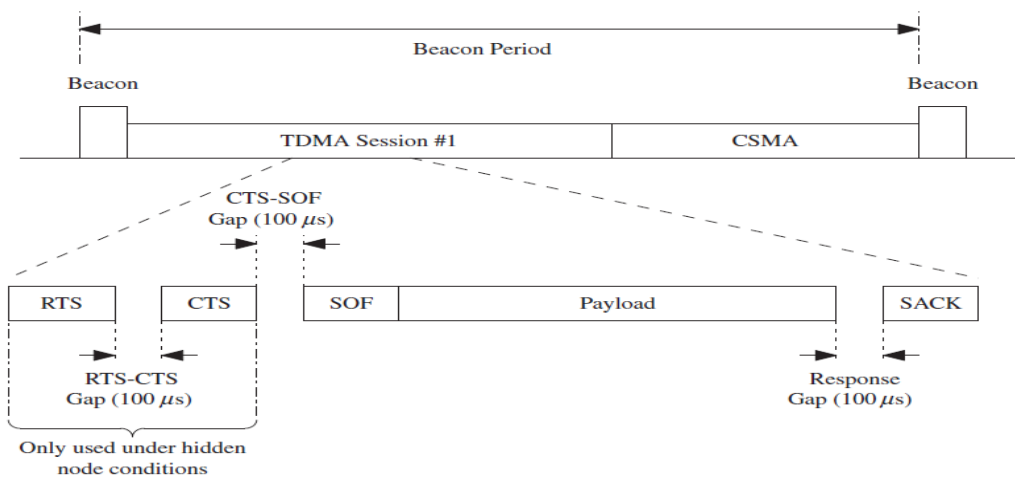
Η δραστηριότητα μέσου σε ένα δίκτυο IEEE 1901 FFT-OFDM περιλαμβάνει μια σειρά



από MPDU που χωρίζονται από διαστήματα μεταξύ πλαισίων. Η πιο βασική δραστηριότητα μέσου είναι ένα Long MPDU που ακολουθείται από ένα SACK. Λόγω της εχθρικής φύσης των καναλιών γραμμής ισχύος, το AV απαιτεί την αναγνώριση των μακροχρόνιων MPDUs, παρόλο που έως και τέσσερις MPDU μπορούν να αποσταλούν σε μια έκρηξη που ακολουθείται από ένα μόνο SACK. Αυτό όχι μόνο εξοικονομεί επιβάρυνση λόγω των οριοθετηρών SACK, αλλά και των επιπλέον κενών απόκρισης. Κάτω από συνθήκες κρυφών κόμβων, αυτό το ατομικό αυξάνεται με RTS / CTS. Η δραστηριότητα σε μια κατανομή TDMA περιλαμβάνει πολλαπλές ανταλλαγές SOF-SACK ή RTS-CTS-SOF-SACK μεταξύ πηγής και προορισμού του LID στο οποίο προορίζεται η κατανομή TDMA (ανατρέξτε στο σχήμα 6.5). Η μέση δραστηριότητα κατά τη διάρκεια των χορηγήσεων του CSMA είναι παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται στο HomePlug1.0. Μετά το τέλος μιας προηγούμενης μετάδοσης, χρησιμοποιούνται δύο υποδοχές για την ανάλυση προτεραιότητας. Η διαμάχη προτεραιότητας διασφαλίζει ότι μόνο οι σταθμοί με την υψηλότερη προτεραιότητα στο δίκτυο διεκδικούν κατά τη διάρκεια του επόμενου παραθύρου διαμάχης. Ένας τροποποιημένος αλγόριθμος δυαδικής εκθετικής οπισθοχώρησης (Binary Exponential Back off) χρησιμοποιείται για την αποφυγή συγκρούσεων στο παράθυρο διαφωνιών (Contention). Ο σταθμός που αποκτά πρόσβαση στο μέσο χρησιμοποιεί ατομικό SOF-SACK ή RTS-CTS-SOF-SACK για τη μετάδοση πληροφοριών (βλ. Εικόνα 6.6).

#### 6.5.4.6 Προσαρμογή καναλιού

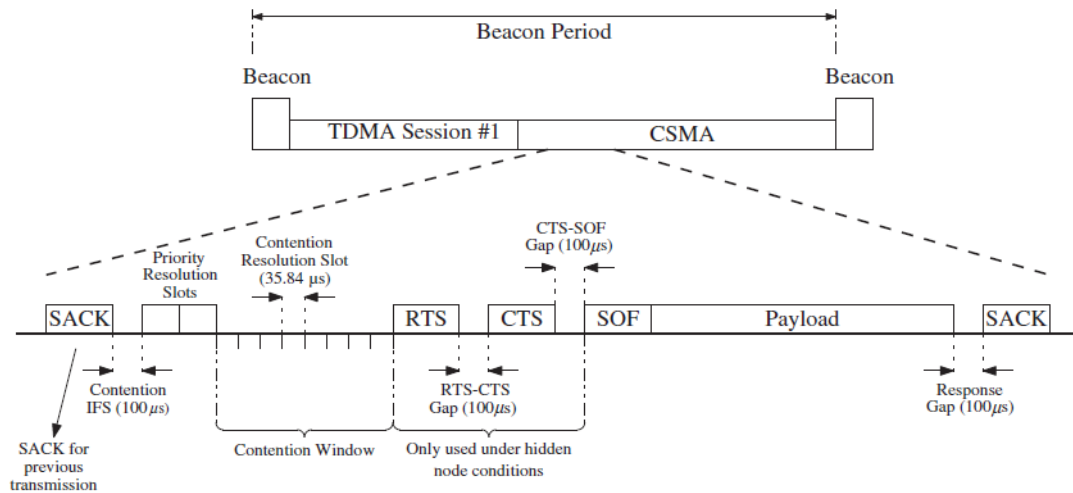
Η σωστή προσαρμογή του καναλιού είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή χρήση του μέσου γραμμής ισχύος. Η προσαρμογή καναλιού στο IEEE 1901 FFT-OFDM είναι μοναδική σε μια διαδρομή (ζεύγος πομπού-δέκτη μονής κατεύθυνσης).



Σχήμα 6.5 Δραστηριότητα μέσου στην κατανομή TDMA.

Επιπλέον, οι χάρτες τόνων IEEE 1901 FFT-OFDM ισχύουν μόνο για τμήματα του κύκλου γραμμής. Οι ρυθμοί δεδομένων που είναι εφικτοί από μια «περιοχή χαρτών τόνων» σε μια άλλη για μια δεδομένη διαδρομή μπορεί να διαφέρουν κατά 50%.

Χρησιμοποιούνται ήχοι MPDU (από τον δέκτη) για να ληφθεί μια αρχική εκτίμηση των αναλογιών σήματος προς θόρυβο (SNR) των υπο-φορέων OFDM. Αυτές οι εκτιμήσεις SNR χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των αρχικά προσαρμοσμένων χαρτών τόνου και των περιοχών τόνου. Κάθε χάρτης τόνου υποδεικνύει τη φόρτιση των δυαδικών ψηφίων σε κάθε έναν από τους Φορείς OFDM και τον ρυθμό φραγής FEC. Οι δέκτες παρακολουθούν συνεχώς τα ποσοστά SNR και σφάλματος σε όλα τα ληφθέντα MPDU και παρέχουν συνεχώς στους πομπούς ενημερώσεις σχετικά με τον τόνο



Σχήμα 6.6 Δραστηριότητα μέσου στην κατανομή CSMA.

τους χάρτες και τις περιοχές ισχύος τους. Αυτό επιτρέπει στους σταθμούς AV να λειτουργούν κοντά στην χωρητικότητα του καναλιού και να αντιδρούν γρήγορα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του καναλιού.

#### 6.5.4.7 Εφαρμογή επιπέδου σύγκλισης

Το Στρώμα Σύγκλισης (CL) σχηματίζει το 'κορυφαίο μισό' του OSI OSI Data Link Layer. Είναι υπεύθυνο για διάφορες λειτουργίες που δεν αποτελούν μέρος ενός παραδοσιακού MAC αλλά είναι απαραίτητες για την παροχή υπηρεσιών QoS. Αυτές οι λειτουργίες περιλαμβάνουν ταξινόμηση πακέτων και αυτόματη εγκατάσταση σύνδεσης.

Όταν δημιουργείται μια σύνδεση, παρέχεται μια συλλογή κανόνων στο επίπεδο σύγκλισης. Αυτή η συλλογή κανόνων (σύνολο παραμέτρων) επιτρέπει στον ταξινομητή να συσχετίζει τα πακέτα που ρέουν μεταξύ των Σημείων Πρόσβασης στις Υπηρεσίες Συνόρων (SAPs) με τις εγκατεστημένες συνδέσεις. Αυτοί οι κανόνες είναι τοπικοί σε κάθε συσκευή, δεν μεταδίδονται μέσω του δικτύου. Παραδείγματα αυτών των κανόνων είναι οι διευθύνσεις προέλευσης και προορισμού, οι τύποι πρωτοκόλλων, οι αριθμοί θυρών κτλ.

Η σύνταξη κανόνων είναι πλούσια και επιτρέπει τον προσδιορισμό της προτεραιότητας κατά την οποία εφαρμόζονται κανόνες και των συνδυασμών Boolean μεμονωμένων κανόνων κατά την ταξινόμηση πακέτων.

Ορισμένα πακέτα που θα παρέχονταν κατάλληλα με μια υπηρεσία επιπέδου φτάνουν στο CL σε κατάσταση «χωρίς σύνδεση». Παραδείγματα περιλαμβάνουν πακέτα που έχουν ληφθεί από εφαρμογές παλαιού τύπου που ξεκινούν τη μετάδοση χωρίς να καθορίζονται παράμετροι QoS και πακέτα γεφυρωμένα από άλλο δίκτυο. Όταν ο ταξινομητής συναντά ένα πακέτο που δεν συνδέεται με μια υπάρχουσα σύνδεση, δρομολογεί το πακέτο στη λειτουργία αυτόματης σύνδεσης για να δημιουργήσει πιθανώς μια σύνδεση. Το Auto-Connect θα προσπαθήσει να προσδιορίσει ποιο επίπεδο QoS, αν υπάρχει, είναι κατάλληλο για τη ροή στην οποία μπορεί να ανήκει το πακέτο. Οι τεχνικές που χρησιμοποιεί η λειτουργία Auto-Connect για τον εντοπισμό συνδέσεων περιλαμβάνουν πρότυπα (π.χ. σύνδεση της κυκλοφορίας σε μια συγκεκριμένη θύρα TCP με συγκεκριμένη χρήση και συμπλήρωση ενός επιπέδου QoS από αυτήν τη χρήση) και heuristics (αυτοδιδασχής) (δηλαδή προσπάθεια προσδιορισμού της ανάγκης για ένα συγκεκριμένο επίπεδο του QoS από τη στατιστική συμπεριφορά της κυκλοφορίας που προσφέρεται). Η λειτουργία Auto-Connect λειτουργεί ως υποκατάστατη εφαρμογή για τις συνδέσεις που δημιουργεί, εκτελώντας τις δραστηριότητες που κανονικά θα εκτελούσε μια εφαρμογή.

#### 6.5.5 Συνύπαρξη

Η διαμόρφωση Wavelet OFDM υποστηρίζεται επίσης από το IEEE 1901 και η συνύπαρξή τους με τα άλλα πρότυπα συζητείται σε αυτή την ενότητα. Η προδιαγραφή IEEE 1901 χρησιμοποιεί ένα πρωτόκολλο διασύνδεσης (ISP) για συνύπαρξη μεταξύ σταθμών πρόσβασης IEEE 1901 και οικιακών σταθμών που χρησιμοποιούν wavelet ή FFT PHY. Ο ISP μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για συνύπαρξη μεταξύ σταθμών IEEE 1901 και G.hn.

Ο ISP είναι ένας μηχανισμός κοινής χρήσης πόρων που ρυθμίζει την πρόσβαση στο μέσο γραμμής ρεύματος. Ο ISP χρησιμοποιεί σήματα συνύπαρξης που επιτρέπουν στους σταθμούς IEEE 1901 να σηματοδοτούν την παρουσία τους και επίσης να καθορίζουν την παρουσία άλλων συστημάτων IEEE 1901 και συστημάτων G.hn. Τα σήματα συνύπαρξης μεταδίδονται κατά περιοδικό τρόπο κατά τη διάρκεια των παραθύρων ISP που εκχωρούνται σε διάφορα συστήματα.

Μία λύση βασισμένη σε πολλαπλές μη διαλειτουργικές PHY με κοινή MAC είναι μια κοινή προσέγγιση στα πρότυπα, π.χ. 802.11. Ωστόσο, ο ορισμός δύο μη διαλειτουργικών PHY οδηγεί επίσης στην ανάγκη χειρισμού της περίπτωσης όταν συσκευές με διαφορετικές PHY βρίσκονται κοντά και συνδέονται με το ίδιο κοινόχρηστο μέσο. Στην αρχική σύλληψή του, ο ISP χειρίστηκε μόνο τη συνύπαρξη των δύο IEEE 1901 PHY, αλλά τώρα ο ISP θα χειριστεί επίσης τη συνύπαρξη μεταξύ των 1901 και G.9960.

### 6.5.5.1 Κυματομορφή ISP και κατάσταση δικτύου

Οι συσκευές πρόσβασης IEEE 1901 (AC) και οικιακής χρήσης In-Home (IH) θα υποδείξουν την παρουσία και τις απαιτήσεις τους με τη μετάδοση ενός συνόλου απλών σημάτων. Η κυματομορφή ISP που περιλαμβάνεται στο πρότυπο 1901 καλείται κυματομορφή συνάρτησης κανονικά κατανεμημένης συνάρτησης (CDCF).

Το σήμα CDCF λαμβάνεται με την επανάληψη των σημάτων OFDM με παράθυρα R βασικής ζώνης. Κάθε σύμβολο OFDM, που σχηματίζεται από ένα σύνολο όλων των δεδομένων ενός BPSK, διαμορφώνεται στις κυματομορφές του φορέα χρησιμοποιώντας ένα αντίστροφο γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (IFFT) 512 σημείων. Το σήμα CDCF ορίζεται ως ( $1 \leq n \leq 512R$ )

$$S_I(n) = N_c W(n) \sum_{C_a} \cos \left( \frac{2\pi C_a n}{512} + \Phi(C_a) \right),$$

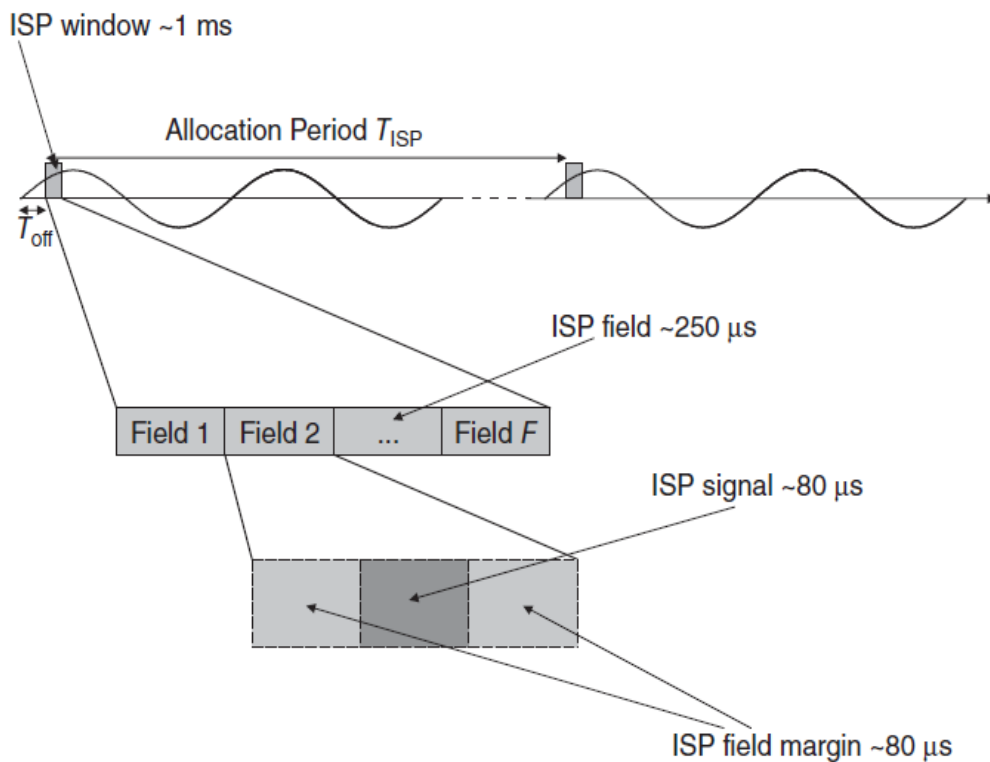
όπου  $N_c$  είναι ένας συντελεστής κανονικοποίησης, το  $W(n)$  είναι μια συνάρτηση παραθύρου, το  $C_a$  είναι ο δείκτης φορέα και το  $\Phi(C_a)$  είναι ένας δυαδικός φορέας φάσης  $\{0, \pi\}$ . Μερικοί από τους φορείς που χρησιμοποιούνται στην παραπάνω εξίσωση μπορούν να καλυφθούν για να ικανοποιήσουν τη μάσκα φασματικής μετάδοσης. Πρόσθετοι φορείς μπορεί να καλύπτονται από τον εξοπλισμό ανάλογα με τους τοπικούς κανονισμούς. Δείγματα κυματομορφών σήματος βάσης μπορούν να αποθηκευτούν στη μνήμη και να εκκενωθούν απευθείας στο DAC, επιτρέποντας έτσι απλή εφαρμογή από οποιοδήποτε PHY.

Αρκετοί φορείς φάσης μπορούν να οριστούν για να δημιουργήσουν ένα σύνολο σημάτων βάσης, δηλ. Το κοινό αλφάβητο που μοιράζεται από όλους τους κόμβους. Ορίζοντας διανύσματα πολλαπλών φάσεων, μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα σύνολο σημάτων CDCF και αυτό το σετ θα αποτελέσει το κοινό «αλφάβητο» που μοιράζονται όλες οι μη διαλειτουργικές συσκευές. Ένα προφανές εμπόδιο με την πολυπλοκότητα προκύπτει όταν καθορίζεται ο πληθάρθμος του συνόλου των σημάτων CDCF που ανήκουν στο αλφάβητο. Ωστόσο, ο στόχος του ISP είναι να είναι όσο το δυνατόν πιο σύνθετος έτσι ώστε η επιλογή σχεδιασμού να μην καθορίζει ένα μεγάλο αλφάβητο των σημάτων CDCF για επικοινωνία δεδομένων μεταξύ μη διαλειτουργικών συσκευών, αλλά να ορίζει επαρκή αριθμό σημάτων CDCF για διευκόλυνση της ανίχνευσης της κατάστασης του δικτύου. Ο ακριβής αριθμός φορέων φάσης είναι ακόμα υπό συζήτηση, αλλά θα κυμαίνεται μεταξύ τεσσάρων και έξι.

Τα σήματα CDCF θα μεταδίδονται στο χρονικό παράθυρο ISP, μια περιοχή χρόνου που χρησιμοποιείται από τις συσκευές PLC για τη μετάδοση / ανίχνευση σημάτων ISP. Το χρονικό παράθυρο ISP εμφανίζεται περιοδικά κάθε φορά  $T_{isp}$  δευτερόλεπτα και διαιρείται περαιτέρω

σε παράθυρα  $F$  χρόνου που ονομάζονται πεδία. Η παρουσία / απουσία σημάτων ISP σε ένα πεδίο μεταδίδει διάφορα είδη πληροφοριών σχετικά με την παρουσία / απουσία μιας συγκεκριμένης συσκευής (AC, IH με FFT-OFDM PHY, IH με Wavelet PHY κλπ.), (χαμηλό, μεσαίο, υψηλό), αιτήματα επανασυγχρονισμού κλπ. Κάθε πεδίο στο παράθυρο ISP έχει διάρκεια περίπου 250  $\mu\text{s}$ , έτσι υπάρχει ένα περιθώριο περίπου 85  $\mu\text{s}$  και στα δύο άκρα του πεδίου ISP. Αυτό επιτρέπει τον χειρισμό ατελούς ανίχνευσης διασταυρώσεως μηδενός, μετατοπίσεις φάσεως που προκαλούνται από φορτίο του σήματος δικτύου και άλλες μη ιδανικές ιδιότητες του καναλιού. Το παράθυρο ISP λαμβάνει χώρα σε κάθε  $T_{isp}$  δευτερόλεπτα (Περίοδος Κατανομής) σε σταθερή απόκλιση  $T_{off}$  σε σχέση με τη μηδενική διέλευση του κύκλου υποκείμενων κύκλων. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 6.7. Δεδομένου ότι υπάρχουν δύο διασταυρώσεις μηδέν σε έναν κύκλο και συχνά υπάρχουν έως τρεις φάσεις σε ένα κτίριο, υπάρχουν στην πραγματικότητα έξι πιθανές περιπτώσεις διασταυρώσεων μηδέν. Προβλέπονται επίσης οι κατάλληλες τεχνικές συγχρονισμού, ώστε να επιτρέπουν σε όλες τις συσκευές που ενδέχεται να βρίσκονται μεταξύ τους να συγχρονίζονται με μία κοινή διασταύρωση μηδενισμού.

Όταν μια συσκευή αρχίζει να λειτουργεί με το μέσο γραμμής ρεύματος, θα καθορίσει πρώτα τη σωστή θέση του παραθύρου ISP και στη συνέχεια θα σαρώσει τα σήματα ISP για να καθορίσει την κατάσταση του δικτύου, δηλαδή τι είδους συστήματα υπάρχουν στο κοινόχρηστο μέσο, ποιες είναι οι απαιτήσεις εύρους ζώνης τους κλπ.

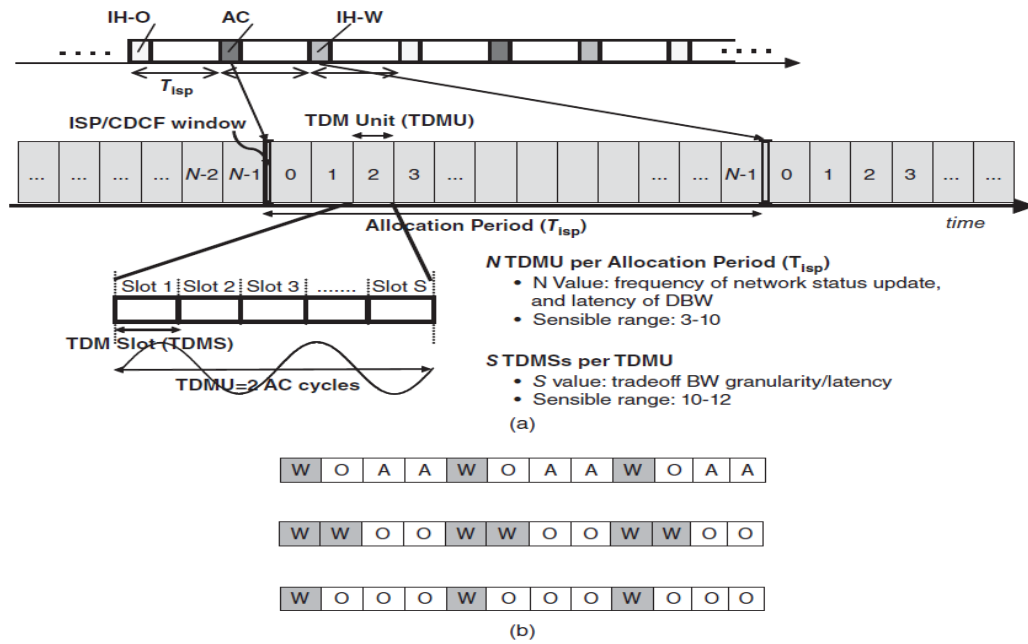


Σχήμα 6.7 Παράθυρο χρόνου ISP, πεδία ISP, περιθώρια πεδίου ISP και παράθυρο ISP. [22] © 2008 IEEE.

Οι συσκευές AC και IH θα υποδείξουν την παρουσία τους καθώς και άλλες χρήσιμες πληροφορίες μεταδίδοντας σήματα ISP στα κατάλληλα πεδία ISP του παραθύρου ISP που αφορούν το σύστημά τους. Συγκεκριμένα, κάθε σύστημα θα χρησιμοποιεί αποκλειστικά ένα παράθυρο ISP κάθε  $T_{isp}$  δευτερόλεπτα. Για παράδειγμα, όλες οι συσκευές IH που χρησιμοποιούν το OFDM PHY (IH-O) χρησιμοποιούν ταυτόχρονα ένα παράθυρο ISP, όλες οι συσκευές AC χρησιμοποιούν ταυτόχρονα το επόμενο παράθυρο ISP και στη συνέχεια όλες τις συσκευές In-Home που χρησιμοποιούν το Wavelet-OFDM PHY ) χρησιμοποιούν ταυτόχρονα την επόμενη, και ούτω καθεξής σε έναν αλγόριθμο round robin. Αυτό επιτρέπει σε όλες τις συσκευές να καθορίζουν χωρίς αμφιβολία την κατάσταση δικτύου κάθε  $3T_{isp}$  δευτερόλεπτα.

#### 6.5.5.2 Υποστήριξη δυναμικής κατανομής εύρους ζώνης (DBA)

Ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, θα πραγματοποιηθούν διάφορες κατανομές πόρων. Η κοινή χρήση TDMA μεταξύ συστημάτων Wavelet και OFDM θα βασίζεται σε Περίοδοι Κατανομής. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.8 (a), θα υπάρχουν N Μονάδες TDM (TDMUs) ανά Περίοδο Κατανομής, όπου η Περίοδος Κατανομής διαρκεί  $T_{isp}$ . Η διάρκεια ενός TDMU ισούται με δύο κύκλους γραμμής ισχύος και κάθε TDMU περιέχει χρονικές θυρίδες S TDMA. Κάθε υποδοχή TDMA θα ανατεθεί αποκλειστικά σε συστήματα AC, IH-O ή IH-W και η πολιτική κατανομής θα βασίζεται στην κατάσταση του δικτύου. Η δίκαιη κατανομή πόρων θα επιτευχθεί με την ανάθεση ενός εύλογου αριθμού υποδοχών TDMA σε κάθε σύστημα που υπάρχει στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Οι λογικές τιμές για τις παραμέτρους N και S που συζητούνται επί του παρόντος είναι:  $3 \leq N \leq 10$  και  $8 \leq S \leq 12$  και ως εκ τούτου η  $T_{isp}$  έχει τιμή μερικών εκατοντάδων χιλιοστών του δευτερολέπτου. Ένα παράδειγμα τριών πιθανών δομών TDMA δίνεται στο Σχήμα 6.8 (b) για την περίπτωση  $S = 12$  και για τρεις διαφορετικές καταστάσεις δικτύου. Με μια περίοδο ίση με την  $T_{isp}$ , οι συσκευές μπορούν να ενημερώσουν την κατάσταση δικτύου και να αλλάξουν τελικά την χρησιμοποιούμενη δομή TDMA για να εξασφαλίσουν αποτελεσματική DBA. Το παράθυρο ISP εμφανίζεται πάντα στην αρχή του TDMU # 0.



Σχήμα 6.8 (α) Γενική δομή TDMA: N TDMU σε μια περίοδο κατανομής και S TDM Slots ανά TDMU (ένα TDMU είναι δύο κύκλοι μακρύς). (β) Εικονογράφηση τριών πιθανών TDMU για την περίπτωση του S = 12: (Ανω) οι TDMSs κατανέμονται κατά 50% στο σύστημα πρόσβασης και 50% στα εσωτερικά συστήματα (25% στα συστήματα Wavelet-OFDM και 25% Τα συστήματα FFT-OFDM (Center) τα TDMSs κατανέμονται κατά 50% στα συστήματα Wavelet-OFDM και 50% στα συστήματα FFT-OFDM, δεδομένου ότι δεν υπάρχει σύστημα πρόσβασης, (Κάτω) ίδιο με την κεντρική περίπτωση αλλά για διαφορετική κατάσταση δικτύου για την περίπτωση που τα συστήματα Wavelet χρειάζονται μειωμένους πόρους στο κατάλληλο πεδίο ISP [22] © 2008 IEEE.

Η διάρκεια ενός TDMS είναι είτε  $40 / S$  ms (50 Hz) είτε  $33.33 / S$  ms (60 Hz) και αυτές οι τιμές είναι ίσες με την ελάχιστη λανθάνουσα κατάσταση του συστήματος που μπορεί να εγγυηθεί το δίκτυο. Για παράδειγμα, για την περίπτωση  $S = 12$ , έχουμε 3,33 ms (50 Hz) ή 2,78 ms (60 Hz). Παρόμοια με την περίπτωση των πεδίων ISP, είναι απαραίτητο να προσθέσετε ένα περιθώριο μερικών μικροδευτερολέπτων γύρω από τα όρια TDMS

### 6.5.5.3 Υποστήριξη της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης υποδοχής TDMA (TSR)

Οι παρεμβολές που παράγονται σε δίκτυα κοινής γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια τυχαία μεταβλητή που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η μεταδιδόμενη ισχύς, η τοπολογία γραμμής ισχύος, οι πρακτικές καλωδίωσης και γείωσης, ο αριθμός των φάσεων δικτύου που παραδίδονται στις εγκαταστάσεις κ.λπ. με άλλες συσκευές που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση, αλλά και με συσκευές που βρίσκονται πιο μακριά, π.χ. σε άλλο όροφο. Σε άλλες περιπτώσεις, ακόμη και μέσα στο ίδιο διαμέρισμα, οι συσκευές μπορούν να προκαλέσουν πολύ διαφορετικά επίπεδα παρεμβολών ανάλογα, για παράδειγμα, εάν βρίσκονται στην ίδια φάση του δικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος ή όχι.

Οι αλγόριθμοι για το TSR εκμεταλλεύονται αυτή τη φυσική ιδιότητα του καναλιού γραμμής ρεύματος επιτρέποντας σε συσκευές, είτε στο ίδιο δίκτυο είτε σε διαφορετικά γειτονικά δίκτυα, να μεταδίδουν ταυτόχρονα χωρίς να προκαλούν παρεμβολές μεταξύ τους. Επί του

παρόντος, κανένα εμπορικό προϊόν PLC δεν έχει αυτή τη δυνατότητα. Συνήθως, στο ίδιο δίκτυο, οι κόμβοι είτε είναι καθορισμένοι ορθογώνιοι πόροι (π.χ. διαφορετικές υποδοχές TDMA) είτε ανταγωνίζονται για πόρους (π.χ. CSMA). Τα αποτελέσματα προσομοίωσης που επιβεβαιώνουν την ικανότητα επίτευξης ουσιαστικών TSR μπορούν να βρεθούν στο [30].

## 6.6 Αξιολόγηση απόδοσης

Η απόδοση της προσέγγισης πλαισίωσης δύο επιπέδων, ανεξάρτητη από τα MPDU και τα γενικά έξοδα πρόσβασης καναλιού, παρουσιάστηκε στο [35]. Συνοψίζουμε αυτά τα αποτελέσματα και στη συνέχεια παρέχουμε τα αποτελέσματα λεπτομερών προσομοιώσεων με βάση τα μετρούμενα χαρακτηριστικά PHY και τις γνωστές παραμέτρους MAC.

### 6.6.1 Επιδόσεις πλαισίων MAC

Με τη συνένωση δύο επιπέδων, πρέπει να αναμεταδίδονται μόνο μπλοκ FEC PHY (PBs) που είναι κατεστραμμένα. Εάν το  $p$  είναι η πιθανότητα ενός σφάλματος FEC μπλοκ, τότε ο αναμενόμενος αριθμός μπλοκ FEC που παρέχονται ανά MPDU είναι  $(1 - p)$  φορές ο αριθμός,  $N$  των μπλοκ FEC. Η αποτελεσματικότητα με τη συνένωση δυο επιπέδων,  $\eta_{2L}$ , δίνεται από

$$\eta_{2L} = (1 - p) \left( \frac{L_{fec} - L_{OH,2L}}{L_{fec}} \right) \left( \frac{L_{MSDU}}{L_{mf}} \right),$$

όπου  $L_{OH}$ , το  $2L$  είναι το overhead ανά FEC block, το  $L_{fec}$  είναι το συνολικό μήκος ενός FEC μπλοκ, το  $L_{MSDU}$  είναι το μέγεθος ενός MSDU και το  $L_{mf}$  είναι το μήκος ενός MAC πλαισίου (MSDU συν επιβάρυνση πλαισίωσης). Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αποτελεσματικότητα IEEE 1901 FFT-OFDM MAC Framing είναι κοντά στο θεωρητικό όριο, καθώς τα γενικά έξοδα στο πλαίσιο MAC και τα επίπεδα PB είναι ελάχιστα.

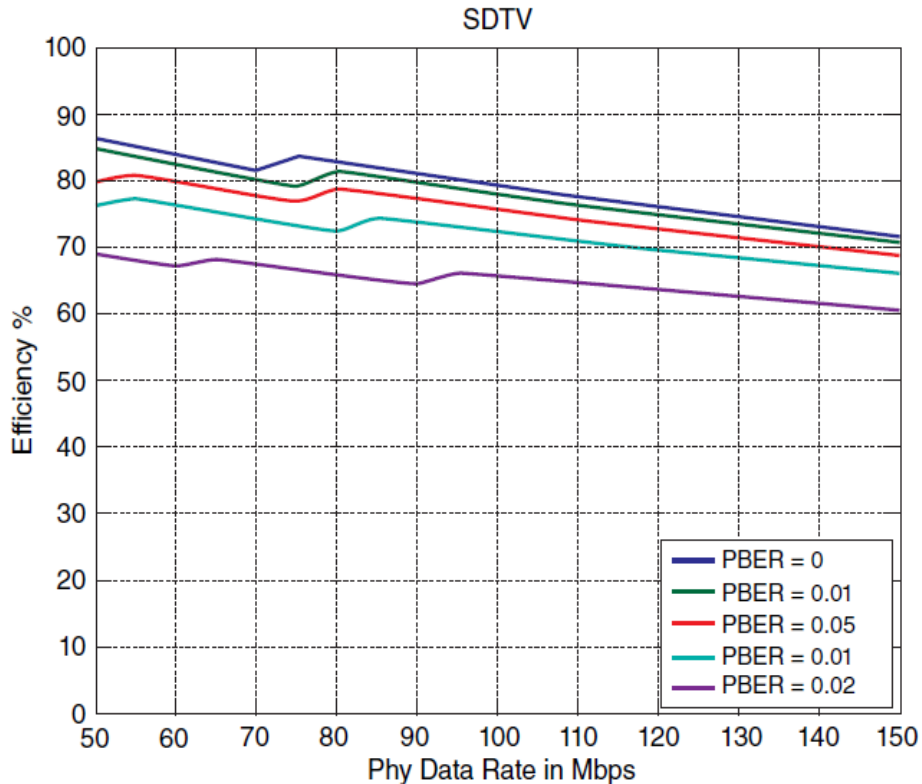
### 6.6.2 Συνολική απόδοση MAC

Χρησιμοποιώντας σημαντικά δεδομένα σχετικά με την κάλυψη, τα ποσοστά διαδρομής και τα ποσοστά σφάλματος για το PHY που προέκυψε από δοκιμές πεδίου, εκτελέσαμε εκτεταμένες προσομοιώσεις για να προβλέψουμε την απόδοση του MAC. Αυτή η ενότητα δίνει τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων.

Η αποδοτικότητα MAC εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η κατανομή μεγέθους των MSDU, ο ρυθμός πηγής, ο ρυθμός σφάλματος PB (PBER), ο ρυθμός σφάλματος του πλαισίου ελέγχου, ο ρυθμός δεδομένων PHY, το μέγεθος του συμβόλου PHY κλπ. Γενικά, η αποδοτικότητα του MAC είναι περίπου 80% , συνήθως λίγο ψηλότερα.



Η αποδοτικότητα MAC μετράται διαιρώντας το συνολικό μήκος των μεταδιδόμενων MSDU με το συνολικό χρόνο που έχει διατεθεί για τη μετάδοσή τους. Δεν συμπεριλαμβάνουμε χρόνο που διατίθεται σε άλλες ροές, αλλά εξετάζουμε τη σηματοδοσία. Ίσως πιο σημαντικό είναι ο καθαρός ρυθμός δεδομένων που είναι διαθέσιμος στην εφαρμογή στο όριο του MAC για ένα δεδομένο ρυθμό PHY.



Σχήμα 6.9 Απόδοση IEEE 1901 FFT-OFDM για SDTV 6-Mbps σε διάφορους ρυθμούς σφάλματος PB.

Το Σχήμα 6.9 δείχνει την αποδοτικότητα MAC, συμπεριλαμβανομένης της απώλειας λόγω αναμετάδοσης, για την SDTV, υποθέτοντας MSDU 1378-byte που αποτελούνται από επτά 188 byte MPEG Transport Frames με 40 bytes της UDP / IP επικεφαλίδα και 22 bytes του IEEE 802.3 overhead, συμπεριλαμβανομένης της ετικέτας εικονικού LAN. Εμφανίζονται αποδοτικότητες για ποσοστά σφάλματος PB που κυμαίνονται από 0 έως 20%. Οι ασυνέχειες στις καμπύλες οφείλονται στα φαινόμενα MPDU και στα όρια έκρηξης. Μεγαλύτερες ταχύτητες δεδομένων οδηγούν σε μικρότερες MPDU για το ίδιο ποσό δεδομένων. Με σταθερά γενικά απομεμακρυσμένα, τα μικρότερα MPDU έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες αποδόσεις, καθώς αυξάνεται ο ρυθμός δεδομένων, ιδιαίτερα για εφαρμογές με χαμηλότερους ρυθμούς πηγής. Το αντίστοιχο αποτέλεσμα για την τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας, αν και δεν παρουσιάζεται εδώ, δείχνει ακόμα καλύτερη απόδοση.

## 6.7 HomePlug AV2

Η προδιαγραφή HomePlug AV 2.0 (AV2) προσθέτει νέες λειτουργίες στο HomePlug AV / IEEE 1901 FFT-OFDM που παρέχουν σημαντική αύξηση της ταχύτητας (έως και 1,5 Gbps) και κάλυψης. Οι μετρήσεις πεδίου δοκιμής έδειξαν ότι το HomePlug AV2 παρέχει απόδοση κάλυψης περίπου 90 Mbps UDP (τρία ίσα streams UDP 30 Mbps το καθένα) για το 99% των δικτύων με τέσσερις ή περισσότερες συσκευές, υποθέτοντας ότι η άμεση επανάληψη εφαρμόζεται. Τα νέα χαρακτηριστικά φυσικού επιπέδου που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη αυτής της απόδοσης περιλαμβάνουν τα σχήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO), την εκτεταμένη ζώνη συχνοτήτων, την αποτελεσματική εγκοπή και τον βραχύ περιορισμό. Οι νέες λειτουργίες στρώματος MAC που περιλαμβάνονται περιλαμβάνουν καθυστερημένη επιβεβαίωση, άμεση επανάληψη και λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας. Αυτή η ενότητα επικεντρώνεται στις βασικές βελτιώσεις του HomePlug AV2, συγκεκριμένα το MIMO, μια εκτεταμένη ζώνη συχνοτήτων, Short Delimiter, καθυστερημένη επιβεβαίωση, αποτελεσματική διάτρηση και άμεση επανάληψη [4].

### 6.7.1 Εκτεταμένη ζώνη συχνότητας

Η προδιαγραφή HomePlug AV 1.1 χρησιμοποιεί τη ζώνη συχνοτήτων από 1,8 έως 30 MHz και το πρότυπο IEEE 1901 αυξάνει σε 1,8 έως 50 MHz. Το HomePlug AV2 επεκτείνει τη ζώνη συχνοτήτων ακόμα περισσότερο στα 1.8-86.13 MHz [36].

Μία από τις προκλήσεις με ζώνες συχνοτήτων άνω των 30 MHz είναι ότι οι κανονισμοί απαιτούν μείωση της φασματικής πυκνότητας ισχύος μετάδοσης (PSD) από 25 έως 30 dB πάνω από 30 MHz. Το κέρδος απόδοσης που παρέχεται από τη ζώνη 30-86,13 MHz είναι γενικά αρκετά υψηλό σε μεσαία έως καλά κανάλια λόγω του σχετικά εύρους ζώνης καναλιού. Ωστόσο, αυτή η πρόσθετη ζώνη δεν προσφέρει πολλά οφέλη στα φτωχότερα κανάλια, π.χ. το χειρότερο 5% των συνδέσεων, λόγω του χαμηλού επιπέδου PSD που επιτρέπεται στον πομπό. Ωστόσο, αυτή η ζώνη συμβάλλει στην απόδοση κάλυψης με δύο τρόπους. Πρώτον, τα περισσότερα κανάλια γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας πέφτουν στην κατηγορία καλής έως μέσης και ο υψηλότερος ρυθμός δεδομένων που παρέχεται σε αυτά τα κανάλια τους επιτρέπει να μειώσουν το χρονικό περιθώριο για την κυκλοφορία τους, επιτρέποντας έτσι περισσότερο χρόνο στο καλώδιο να είναι διαθέσιμο για κυκλοφορία σε φτωχότερες κανάλια. Επίσης, όταν η ζώνη υψηλότερων συχνοτήτων χρησιμοποιείται με την άμεση επανάληψη, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 6.7.3, παρατηρούνται δραματικές βελτιώσεις στην απόδοση ακόμη και σε κακές διαδρομές εκμεταλλευόμενες τις υψηλότερες συνδέσεις δεδομένων μέσω ενός επαναλήπτη.

### 6.7.1.1 Power Back-Off

Το Power Back-off είναι ένα χαρακτηριστικό που εισήχθη στο HomePlug AV2 για να βελτιωθεί η απόδοση σε σχετικά καλά καλωδιακά κανάλια. Η πρακτική εφαρμογή του συστήματος πομπού-δέκτη έχει περιορισμένο δυναμικό εύρος στους μετατροπείς αναλογικού-ψηφιακού σήματος (ADC) και μετατροπείς ψηφιακού σε αναλογικό (DAC) και επομένως τους φορείς OFDM στη ζώνη υψηλών συχνοτήτων (δηλαδή άνω των 30 MHz) υφίστανται στρεβλώσεις εξαιτίας του μειωμένου επιπέδου PSD σε σύγκριση με εκείνο της ζώνης χαμηλότερων συχνοτήτων (δηλαδή κάτω των 30 MHz). Αυτό οφείλεται στον θόρυβο κβαντισμού στον ADC και στην DAC και στην περιορισμένη γραμμικότητα του οδηγού γραμμής. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα σε καλούς σταθμούς γραμμής ισχύος, το PSD μετάδοσης στην κατώτερη ζώνη συχνοτήτων μπορεί να μειωθεί έτσι ώστε να υπάρχει μικρότερη παραμόρφωση στους φορείς OFDM στη ζώνη υψηλών συχνοτήτων.

### 6.7.2 Αποτελεσματική διάτρηση

Το HomePlug AV 1.1 δηλώνει OFDM με παράθυρο, για να πάρει τις 30 dB βαθιές εγχοπές που απαιτούνταν να επιτευχθούν ώστε να μην έχουν μεταδόσεις στις ερασιτεχνικές ζώνες. Αυτή η απαίτηση καταργήθηκε στο HomePlug AV2 και επιτράπηκαν εναλλακτικές υλοποιήσεις. Εναλλακτικές εφαρμογές όπως η προσθήκη σταθερών και / ή προγραμματιζόμενων φίλτρων IIR ή FIR ή συνδυασμός παραθύρων και φίλτρων επιτρέπονται στο HomePlug AV2. Για να υποστηριχθεί αυτό, προστέθηκαν μικρότερα διαστήματα φρουράς και έγιναν άλλες αλλαγές πρωτοκόλλου για την υποστήριξη πρόσθετων φορέων OFDM όταν υποστηρίζονται από έναν πομπό.

### 6.7.3 Άμεση επανάληψη

Το HomePlug AV2 υποστηρίζει την επανάληψη και τη δρομολόγηση της κυκλοφορίας όχι μόνο για την αντιμετώπιση κρυφών κόμβων αλλά και για τη βελτίωση της κάλυψης (δηλ. των επιδόσεων στα χειρότερα κανάλια). Η λειτουργία επανάληψης και δρομολόγησης που χρησιμοποιείται από το HomePlug AV2 είναι η ίδια όπως στο IEEE 1901 που συζητήθηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Με τα συστήματα HomePlug AV2, οι κρυμμένοι κόμβοι είναι πολύ σπάνιοι. Ωστόσο, ορισμένοι σύνδεσμοι ενδέχεται να μην υποστηρίζουν την ταχύτητα δεδομένων που απαιτείται για ορισμένες εφαρμογές, όπως μια ροή βίντεο 3D HD και άλλες εφαρμογές πολυμέσων υψηλής ταχύτητας. Σε ένα δίκτυο όπου υπάρχουν πολλαπλές συσκευές AV2, η σύνδεση μέσω ενός επαναλήπτη παρέχει υψηλότερο ρυθμό δεδομένων από την άμεση διαδρομή για τα κακά κανάλια. Η άμεση επανάληψη είναι μια νέα λειτουργία στο AV2 που επιτρέπει την υψηλή

αποτελεσματική επανάληψη. Η άμεση επανάληψη παρέχει ένα μηχανισμό για τη χρήση ενός επαναλήπτη με πρόσβαση σε ένα κανάλι και η επιβεβαίωση δεν περιλαμβάνει τον επαναλήπτη. Με αυτήν την προσέγγιση, η λανθάνουσα κατάσταση μειώνεται με την επανάληψη, υποθέτοντας ότι ο προκύπτων ρυθμός δεδομένων είναι υψηλότερος, τα προφανή κριτήρια για τη χρήση της επανάληψης στην πρώτη θέση. Επίσης ο δέκτης δεν έχει καμία ευθύνη αναμετάδοσης για αποτυχημένα τμήματα [4].

#### *6.7.4 Σύντομη οριοθέτηση και καθυστερημένη επιβεβαίωση*

Τα χαρακτηριστικά σύντομης οριοθέτησης και καθυστερημένης επιβεβαίωσης προστέθηκαν στο HomePlug AV2 για να μειώσουν τα γενικά έξοδα στα ωφέλιμα φορτία μετάδοσης και να αυξήσουν την αποδοτικότητα. Τα γενικά έξοδα οδηγούν σε σχετικά χαμηλή αποδοτικότητα TCP στα συστήματα HomePlug AV 1.1. Ένας από τους στόχους που επιτεύχθηκαν με την εισαγωγή αυτών των χαρακτηριστικών ήταν η επίτευξη της απόδοσης του TCP σχετικά κοντά σε εκείνη του UDP.

Προκειμένου να αποσταλεί ένα πακέτο δεδομένων ωφέλιμου φορτίου σε ένα θορυβώδες κανάλι, απαιτείται η σηματοδότηση για να υποδείξει στον δέκτη την αρχή του πακέτου και για την εκτίμηση του καναλιού έτσι ώστε να μπορεί να αποκωδικοποιηθεί το ωφέλιμο φορτίο. Απαιτείται πρόσθετη σηματοδότηση για να αναγνωρισθεί ότι το ωφέλιμο φορτίο λήφθηκε με επιτυχία. Πρέπει να υπάρχουν χώροι μεταξύ πλαισίων μεταξύ της μετάδοσης του ωφέλιμου φορτίου και της επιβεβαίωσης, προκειμένου ο δέκτης να αποκωδικοποιήσει, να ελέγξει το ωφέλιμο φορτίο για την επιτυχή λήψη και να κωδικοποιήσει την επιβεβαίωση. Αυτά τα γενικά έξοδα είναι ακόμα πιο σημαντικά για το ωφέλιμο φορτίο TCP, καθώς η επιβεβαίωση σε αυτή την περίπτωση πρέπει να μεταδοθεί προς την αντίθετη κατεύθυνση.

##### *6.7.4.1 Σύντομος οριοθέτης*

Ο αποδιαμορφωτής που καθορίζεται στο AV 1.1 περιέχει τα σύμβολα ελέγχου προοιμίου και πλαισίου και χρησιμοποιείται για την έναρξη των δεδομένων PPDU's καθώς και για άμεσες επιβεβαιώσεις. Το μήκος του αποδιαμορφωτή AV 1.1 είναι 110,5 μικροδευτερόλεπτα και μπορεί να αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό ποσό γενικών εξόδων για κάθε πρόσβαση καναλιού. Ένας νέος μονός οριοθέτης συμβόλων OFDM καθορίζεται στο AV2 για να μειωθεί η επιβάρυνση που σχετίζεται με τους οριοθέτες μειώνοντας το μήκος στα 55,5 μικροδευτερόλεπτα.

Ένας από τους περιορισμούς του Short Delimiter είναι ότι δεν μπορεί εύκολα να ανιχνευθεί ασυγχρόνως, κάτι που είναι απαραίτητο για την πρόσβαση στο κανάλι CSMA. Έτσι, η λήψη του σύντομου οριοθέτη απαιτεί ο παραλήπτης να γνωρίζει τη θέση στο χρόνο όπου μεταδόθηκε ο σύντομος απομεταδότης. Έτσι, η χρήση του Short Delimiter περιορίζεται στην

επιλεκτική επιβεβαίωση των CSMA και TDMA Long MPDUs, Reverse Start of Frame και TDMA Start of Frame.

#### 6.7.4.2 Καθυστερημένη επιβεβαίωση

Ο χρόνος επεξεργασίας για την αποκωδικοποίηση του τελευταίου συμβόλου OFDM και την κωδικοποίηση της επιβεβαίωσης μπορεί να είναι αρκετά υψηλός, απαιτώντας έτσι ένα αρκετά μεγάλο χώρο απόκρισης μεταξύ πλαισίων (RIFS). Στο AV 1.1, δεδομένου ότι το προοίμιο είναι ένα σταθερό σήμα, τα τμήματα προοιμίου της επιβεβαίωσης μπορούν να μεταδοθούν ενώ ο δέκτης εξακολουθεί να αποκωδικοποιεί το τελευταίο σύμβολο OFDM και να κωδικοποιεί το ωφέλιμο φορτίο για την επιβεβαίωση. Με το Short Delimiter, κωδικοποιείται το προοίμιο το ίδιο σύμβολο OFDM με το ωφέλιμο φορτίο για την επιβεβαίωση, έτσι ώστε τα RIFS θα πρέπει να είναι μεγαλύτερα από ό, τι για το AV 1.1, εξαλείφοντας μεγάλο μέρος του κέρδους που παρέχει ο Short Delimiter. Η καθυστερημένη επιβεβαίωση λύνει αυτό το πρόβλημα αναγνωρίζοντας τα τμήματα που τελειώνουν στο τελευταίο σύμβολο OFDM στη μετάδοση επιβεβαίωσης της επόμενης PPDU. Αυτό επιτρέπει πρακτικές υλοποιήσεις με ένα πολύ μικρό RIFS, μειώνοντας το ύψος των RIFS κοντά στο μηδέν. Το AV2 επιτρέπει επίσης την επιλογή καθυστέρησης της αναγνώρισης για τα τμήματα που τελειώνουν στο δεύτερο έως το τελευταίο σύμβολο OFDM για να παρέχουν ευελιξία στους υλοποιητές.

Ο συνδυασμός Short Delimiter και Delay Acknowledgment μπορεί να προσφέρει σημαντική βελτίωση στην αποδοτικότητα TCP και UDP.

### 6.8 ITU-T G.996x (G.hn)

Το ITU-T ξεκίνησε το έργο «G.hn» το 2006 με στόχο την ανάπτυξη μιας παγκόσμιας σύστασης για έναν ενοποιημένο πομποδέκτη HN επόμενης γενιάς ικανό να λειτουργεί σε όλους τους τύπους καλωδιώσεων στο σπίτι: τηλεφωνικές γραμμές, γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, και καλώδια Cat 5 και ταχύτητες bit μέχρι 1 Gbps. Τον Δεκέμβριο του 2008, η ITU-T συμφώνησε με τη σύσταση G.9960, η οποία είναι το ίδρυμα G.hn και καθορίζει την αρχιτεκτονική του συστήματος, τα περισσότερα από τα τμήματα MAC που σχετίζονται με τη διαδρομή PHY και την πορεία δεδομένων. Η τεχνολογία στοχεύει σε κατοικημένες κατοικίες και δημόσιους χώρους, όπως μικρά / οικιακά γραφεία, πολυκατοικίες ή ξενοδοχεία. Ο G.9960 δεν απευθυνόταν αρχικά σε εφαρμογές PLC Access και Smart Grid, αλλά στα μέσα του 2009 εγκρίθηκε από την ομάδα πρόταση για την αντιμετώπιση εφαρμογών Smart Grid. Η οικογένεια προτύπων G.996x υποβλήθηκε σε διάφορες τροποποιήσεις τα τελευταία χρόνια και οι πιο πρόσφατες προδιαγραφές βρίσκονται στις [23] - [27].

Το G.9960 επιτρέπει έως και 250 κόμβους που λειτουργούν στο δίκτυο. Ορίζει πολλά Προφίλ για την αντιμετώπιση εφαρμογών με πολύ διαφορετική πολυπλοκότητα εφαρμογής. Οι

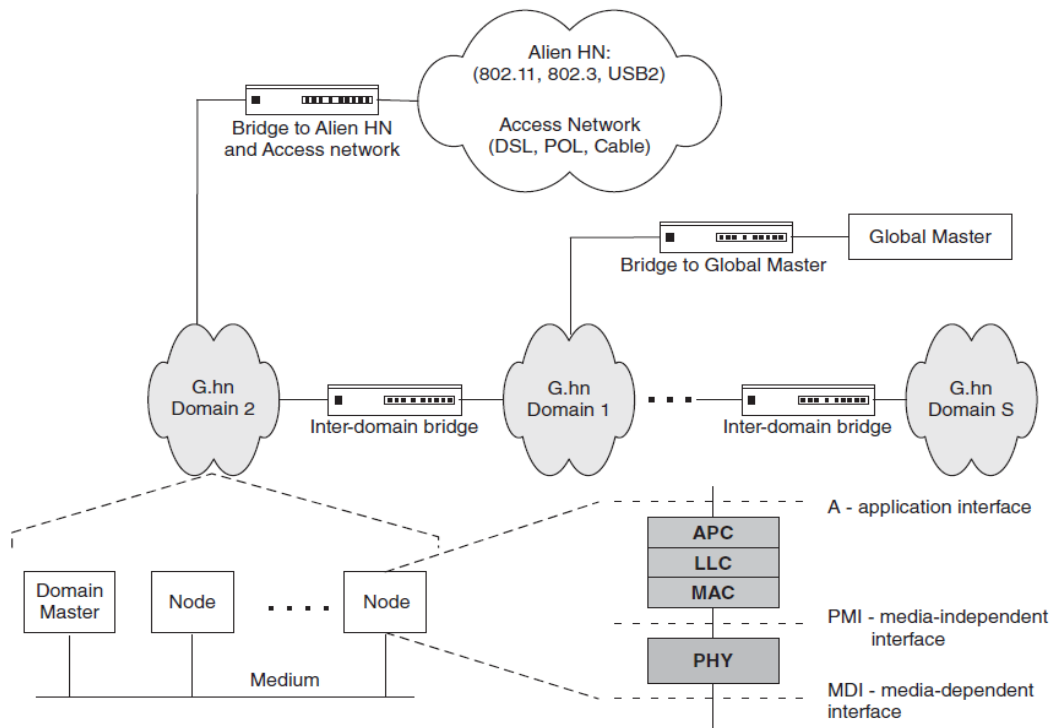
συσκευές υψηλού προφίλ, όπως πύλες οικιακής χρήσης, είναι σε θέση να παρέχουν πολύ υψηλή απόδοση και εξελιγμένες λειτουργίες διαχείρισης. Οι συσκευές χαμηλού προφίλ, όπως η αυτοματοποίηση στο σπίτι ή οι εφαρμογές Smart Grid, έχουν χαμηλή απόδοση και μόνο βασικές λειτουργίες διαχείρισης, αλλά μπορούν να αλληλεπιδρούν με υψηλότερα προφίλ.

Οι προηγούμενες προσεγγίσεις υπογράμμισαν τη βελτιστοποίηση του πομποδέκτη μόνο για ένα μόνο μέσο, δηλ. Είτε για γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είτε για τηλεφωνικές γραμμές ή καλώδια ομοαξονικής γραμμής. Η προσέγγιση που επιλέχθηκε για το G.9960 είναι ένας μόνο πομποδέκτης βελτιστοποιημένος για πολλαπλά μέσα. Έτσι, οι πομποδέκτες G.9960 παραμετροποιούνται έτσι ώστε να μπορούν να οριστούν σχετικές παράμετροι ανάλογα με τον τύπο καλωδίωσης [28]. Για παράδειγμα, έχει επιλεγεί ένα βασικό σχήμα πολλαπλών γραμμών βασισμένο σε παράθυρο OFDM για όλα τα μέσα, αλλά μερικές παραμέτροι OFDM, όπως ο αριθμός των υπο-φορέων και η απόσταση του υπο-φορέα, εξαρτώνται από τα μέσα. Ομοίως, καθορίζεται ένα προοίμιο τριών τμημάτων για όλα τα μέσα, αλλά οι διάρκειες αυτών των τμημάτων αλλάζουν σε βάση ανά μέσο. Ένας κώδικας ημι κυκλικού ελέγχου της ισότητας χαμηλής πυκνότητας (QC-LDPC) έχει επιλεγεί για τη διόρθωση σφάλματος προς τα εμπρός (FEC), αλλά για κάθε τύπο μέσου [22] ορίζεται ένα συγκεκριμένο σύνολο ρυθμών κωδικοποίησης και μεγέθους μπλοκ. Μια παραμετροποιημένη προσέγγιση επιτρέπει επίσης σε κάποιο βαθμό βελτιστοποίηση σε μια βάση μέσων για την αντιμετώπιση των χαρακτηριστικών του καναλιού των διαφορετικών καλωδίων χωρίς να θυσιάζεται η δομοστοιχείωση, η ευελιξία και το κόστος.

### *6.8.1 Επισκόπηση της αρχιτεκτονικής δικτύων G.9960*

Ένα δίκτυο G.9960 αποτελείται από έναν ή περισσότερους τομείς, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.10. Στο G.9960, μια περιοχή αποτελείται από όλους τους κόμβους που μπορούν να επικοινωνούν και / ή να αλληλεπιδρούν άμεσα μεταξύ τους.

Επομένως, δεν υπάρχει παρέμβαση μεταξύ διαφορετικών τομέων του ίδιου δικτύου, εκτός από τις παρεμβολές μεταξύ στενά δρομολογημένων καλωδίων. Ένας από τους κόμβους είναι Domain Master (DM). Ελέγχει τη λειτουργία όλων των κόμβων στον τομέα, συμπεριλαμβανομένης της εισαγωγής στον τομέα, της κράτησης εύρους ζώνης, της παραίτησης και άλλων λειτουργιών διαχείρισης. Σε περίπτωση αποτυχίας ενός DM, η λειτουργία DM μεταβιβάζεται σε έναν άλλο κόμβο στον τομέα.

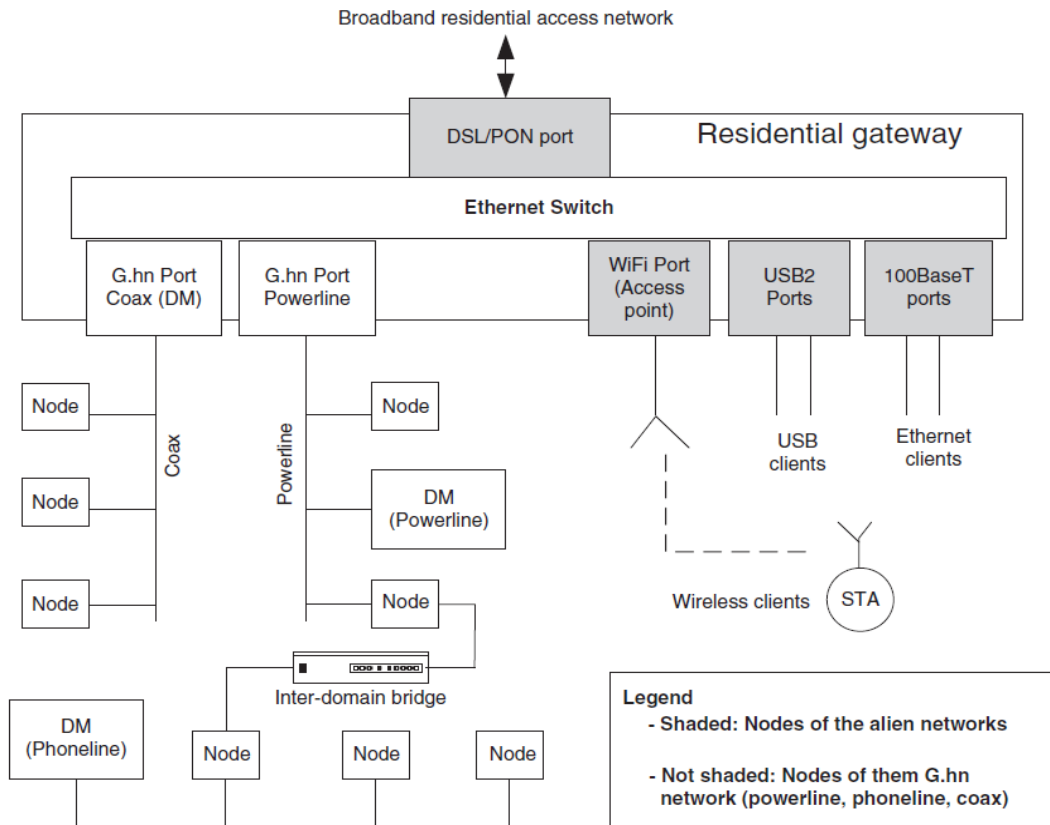


Σχήμα 6.10 Μοντέλο δικτύου G.9960, δομή τομέα και μοντέλο αναφοράς πρωτοκόλλου ενός κόμβου. [28]© 2009 IEEE.

Δεδομένου ότι όλοι οι κόμβοι του δικτύου που μπορούν να επικοινωνούν ή να αλληλεπιδρούν άμεσα μεταξύ τους βρίσκονται στον ίδιο τομέα, το DM μπορεί να αποφύγει την παρεμβολή μεταξύ των κόμβων συντονίζοντας τον χρόνο εκπομπής τους. Αυτό είναι απλούστερο και αποδοτικότερο από το συντονισμό των μεταδόσεων σε αρκετούς τομείς που μοιράζονται το μέσο. Το τελευταίο εξακολουθεί να είναι απαραίτητο όταν το μέσο μοιράζεται μεταξύ γειτονικών δικτύων, όπως σε πολλές τοποθετήσεις σε γραμμές μεταφοράς ενέργειας. Ο χρήστης μπορεί επίσης να δημιουργήσει πολλαπλούς τομείς στο ίδιο μέσο, π.χ. επιτρέποντας τη λειτουργία των ζωνών βασικής ζώνης και της ζώνης ζεύξης στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ή χρησιμοποιώντας διαφορετικά κανάλια RF σε ομοαξονικό δίκτυο.

Οι τομείς του ίδιου δικτύου συνδέονται με γέφυρες μεταξύ τομέων. Αυτό επιτρέπει σε κόμβους οποιουδήποτε τομέα να «βλέπουν» άλλους κόμβους οποιουδήποτε άλλου τομέα στο δίκτυο. Οποιοσδήποτε τομέας μπορεί επίσης να γεφυρωθεί σε ασύρματα ή ασύρματα δίκτυα αλλοδαπών, π.χ. DSL, PLC Access, WLAN ή άλλες τεχνολογίες HN.

Οι κόμβοι του ίδιου τομέα μπορούν να επικοινωνούν με άλλους κόμβους απευθείας ή μέσω ενός ή περισσότερων ρελέ. Στην κεντρική λειτουργία, οι κόμβοι μιλούν ο ένας στον άλλο μέσω ενός αποκλειστικού κόμβου αναμετάδοσης που ονομάζεται Σημείο Πρόσβασης Domain. Οι κόμβοι που είναι κρυμμένοι από το DM συντονίζονται μέσω κόμβων DM-proxy που εκχωρούνται από το DM.



Σχήμα 6.11 Παράδειγμα τοπολογίας HN που σχετίζεται με την κατοικημένη πρόσβαση. [28] © 2009 IEEE.

Ένα παράδειγμα οικιακής HN παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.11. Το δίκτυο περιλαμβάνει τρεις τομείς: over coax, τηλεφωνική γραμμή και γραμμή ισχύος, καθένα από τα οποία ελέγχεται από το DM. Τα αλλοδαπά δίκτυα είναι δίκτυα WLAN, USB2, Ethernet και οικιακά δίκτυα πρόσβασης. Μια κατοικημένη πύλη γεφυρώνει την ηλεκτρική γραμμή και τους ομοαξονικούς τομείς και γεφυρώνει το δίκτυο G.9960 σε αλλοδαπά δίκτυα. Κάθε κόμβος G.9960 είναι ρυθμισμένος να λειτουργεί μέσω του μέσου στο οποίο είναι συνδεδεμένο και μπορεί να επικοινωνεί απευθείας με οποιονδήποτε άλλο κόμβο της δικής του περιοχής και, μέσω διακλαδικών γεφυρών, με κόμβους άλλων τομέων. Οι επικοινωνίες με κόμβους αλλοδαπών δικτύων, συμπεριλαμβανομένων των δικτύων ευρυζωνικής πρόσβασης, περνούν από την πύλη της οικίας.

Ο G.9960 προβλέπει επίσης συσκευές πολλαπλών θυρών που επικοινωνούν σε πολλαπλά μέσα μέσω ξεχωριστών θυρών. Δεδομένου ότι οποιαδήποτε συσκευή θα συνδέεται ούτως ή άλλως σε μια πρίζα, η σχεδίαση μιας συσκευής διπλής θύρας (π.χ. γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και καλωδίου) φαίνεται να αποτελεί φυσική προέκταση μιας σύνδεσης ηλεκτρικής γραμμής. Η δυνατότητα πολλαπλών θυρών μπορεί να αυξήσει τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και την κάλυψη δεδομένου ότι η κυκλοφορία δεδομένων μπορεί να διαχωριστεί μεταξύ μέσων. Από την άποψη της εφαρμογής, μια συσκευή πολλαπλών θυρών εμφανίζεται ως



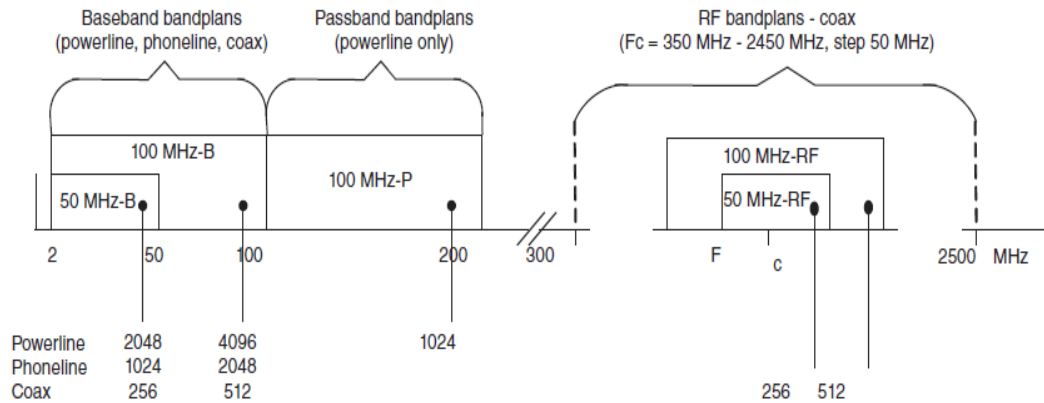
μια ενιαία οντότητα, ενώ ο χειρισμός της κυκλοφορίας δικτύου πάνω από τις διαθέσιμες φυσικές θύρες γίνεται στο επίπεδο LLC. Αν ενισχυθεί με δυνατότητα αναμετάδοσης, μπορεί επίσης να χρησιμεύσει ως γέφυρα μεταξύ τομέων PHY.

Οι τομείς του ίδιου δικτύου ενδέχεται να απαιτούν αμοιβαίο συντονισμό για την αποφυγή υπερβολικών παρεμβολών από το ένα στο άλλο (λόγω στενά δρομολογημένων καλωδίων) ή όταν έχουν εγκατασταθεί περισσότεροι από ένας τομείς στο μέσο στην ίδια ζώνη συχνοτήτων (αυτή η εξαιρετική κατάσταση μπορεί να συμβεί εάν δεν υπάρχει άλλη διαθέσιμη ζώνη συχνοτήτων), ή για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των συνδέσεων που δρομολογούνται μέσω πολλαπλών τομέων. Ο συντονισμός μεταξύ τομέων αποτελεί ευθύνη του Global Master (GM), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.10. Η GM συλλέγει στατιστικά στοιχεία από τομείς και εξωτερικές οντότητες διαχείρισης, παράγει κατάλληλες παραμέτρους για κάθε τομέα, όπως είναι η ισχύς μετάδοσης, το χρονοδιάγραμμα, το εύρος ζώνης κ.λπ., και τις μεταδίδει στους DM των συντονισμένων τομέων. Κάθε DM επιβάλλει αυτές τις παραμέτρους σε όλους τους κόμβους του τομέα του.

Ο G.9960 διευκολύνει τη συνύπαρξη δικτύων που μοιράζονται την ίδια ζώνη μέσων και συχνοτήτων (για παράδειγμα δίκτυα γειτονικών γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας) περιορίζοντας την αμοιβαία παρεμβολή τους. Οι ακόλουθοι μηχανισμοί συνύπαρξης επιτρέπουν τη λειτουργία πολλαπλών δικτύων με περιορισμένη υποβάθμιση των επιδόσεων:

- με γειτονικά δίκτυα G.9960 μέσω αμοιβαίου συντονισμού των μεταδόσεων και της ανταλλαγής πόρων ·
- με αλλοδαπό IH και δίκτυα πρόσβασης που υποστηρίζουν το πρωτόκολλο μεταξύ των συστημάτων Inter System Protocol (ISP), μηχανισμό συνύπαρξης που βρίσκεται υπό εξέλιξη στα πρότυπα IEEE 1901 και ITU-T [30] ·
- με αλλοδαπό IH και δίκτυα πρόσβασης που δεν υποστηρίζουν ISP μέσω διαμόρφωσης PSD ή υπο-φορέα κάλυψη προς τα πάνω του φάσματος στη ζώνη διέλευσης ή σε διαφορετικό κανάλι RF (βλέπε σχήμα 6.12). Επιπλέον, μια συσκευή διπλής λειτουργίας που λειτουργεί ταυτόχρονα ως G.9960 και ένας αλλοδαπός κόμβος μπορεί να διευκολύνει τη συνύπαρξη συντονίζοντας τα δίκτυα G.9960 με τα γειτονικά αλλοδαπά δίκτυα που δεν ανήκουν στο ISP (π.χ. HomePlug AV, HD-PLC, UPA κ.λπ.).
- με συστήματα ομοαξονικών RF μέσω μηχανισμού ευκινησίας συχνότητας: μόλις ανιχνευτεί ένα ξένο σήμα RF το DM θα μετακινήσει όλους τους κόμβους σε άλλο κανάλι RF.
- με ραδιοφωνικές υπηρεσίες, αποφεύγοντας τις συχνότητες που κατανέμονται σε διεθνείς ραδιοερασιτεχνικές ζώνες και την απενεργοποίηση ή τη μείωση της ισχύος όλων των παρεμβαλλόμενων υπο-φορέων.

Λεπτομέρειες σχετικά με τα πρωτόκολλα συνύπαρξης, συμπεριλαμβανομένων των πολιτικών κοινής χρήσης πόρων, βρίσκονται υπό μελέτη.



Σχήμα 6.12 Ζώνες ζωνών G.9960. Ο αριθμός των υπο-φορέων OFDM που χρησιμοποιούνται για κάθε μέσο και εύρος ζώνης παρουσιάζεται επίσης. [28] © 2009 IEEE.

### 6.8.2 Επισκόπηση της Φυσικής Στρώσης της ITU-T G.hn

#### 6.8.2.1 Χρήση διαμόρφωσης και φάσματος

Ο G.9960 έχει υιοθετήσει παράθυρο OFDM με το ακόλουθο προγραμματιζόμενο σύνολο παραμέτρων για την αντιμετώπιση διαφορετικών τύπων καλωδίων:

- αριθμός υπο-φορέων,  $N = 2^n$ ,  $n = 8$  έως  $12$ ,
- απόσταση μεταξύ του φορέα ως  $F_{SC} = 2k \times 24,4140625 \text{ kHz}$ ,  $k = 0, 1, \dots, 6$ ;
- κεντρική συχνότητα  $F_C$ ;
- μέγεθος παραθύρου.

Οι τιμές των παραμέτρων που εξαρτώνται από τα μέσα επιλέγονται λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά καναλιών διαφορετικών τύπων μέσων. Για την απλούστευση του σχεδιασμού του διαμορφωτή εφαρμόστηκαν τα ακόλουθα κριτήρια:

- όλες οι τιμές για την απόσταση υπο-φορέα ( $F_{SC}$ ) είναι πολλαπλάσια ισχύος 2 βασικής απόστασης.
- Όλες οι τιμές για τον αριθμό των υπο-μεταφορέων ( $N$ ) είναι δυνάμεις δύο.
- όλες οι τιμές της συχνότητας δειγματοληψίας είναι διαιρέτες μιας κοινής συχνότητας αναφοράς.

Το σύνολο τιμών των αποστάσεων υπο-φορέων και της συχνότητας δειγματοληψίας περιλαμβάνει εκείνες που χρησιμοποιούνται από το 1901 OFDM PHY για PLC και από το MoCA (Multimedia over Coax Alliance) για το RF coax για την απλοποίηση της εφαρμογής συσκευών διπλής λειτουργίας.

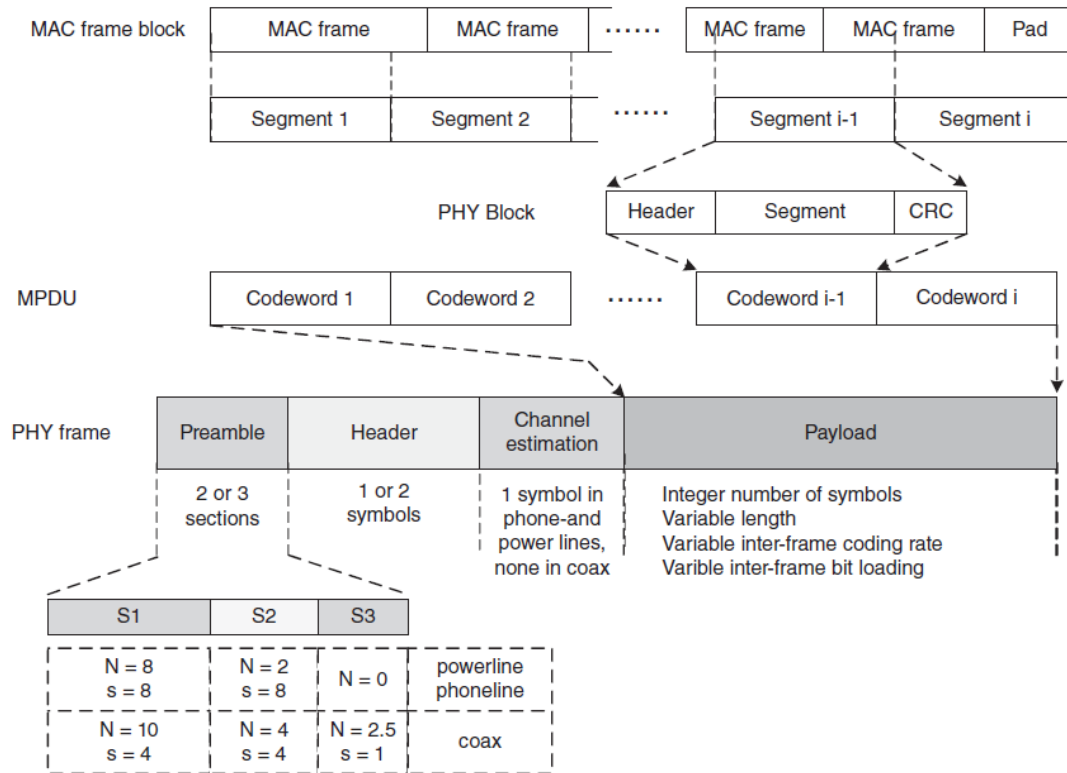
Ο G.9960 ορίζει τη λειτουργία σε διάφορες περιοχές συχνοτήτων, που αναφέρονται ως

πλάκα ζώνης, και περιλαμβάνει πλάκα ζώνης βάσης, πλάκες ζώνης διαπερατότητας και πλάκες ζώνης ραδιοσυχνοτήτων (RF bandplans), βλέπε σχήμα 6.12. Για κάθε συγκεκριμένο μέσο και εύρος ζώνης, ο G.9960 ορίζει μόνο ένα ενιαίο σύνολο παραμέτρων OFDM έτσι ώστε τα επικαλυπτόμενα σχέδια ζωνών να χρησιμοποιούν το ίδιο διάστημα υπο-φορέα. Αυτός ο κανόνας, συν μια ενοποιημένη δομή προκαθορισμένων ανά μεσαίο μέσο και κεφαλίδα πλαισίου PHY, διευκολύνει τη διαλειτουργικότητα, δηλ. επιτρέπει σε όλες τις συσκευές που μοιράζονται την ίδια ζώνη συχνοτήτων να επικοινωνούν μεταξύ τους. Ο αριθμός των υπο-φορέων που χρησιμοποιούνται σε κάθε λωρίδα εξαρτάται από τον τύπο του μέσου και κυμαίνεται από 256 έως 4096 (Σχήμα 6.12). Υπάρχουν επίσης οκτώ επιλέξιμες τιμές για το μήκος CP ωφέλιμου φορτίου:  $kN / 32$ ,  $k = 1, 2, \dots, 8$ . Για να αντιμετωπιστεί η λειτουργία στη βασική ζώνη, στη ζώνη διέλευσης και στο RF, ένας γενικός ρυθμιστής OFDM που συνδέεται με έναν διαμορφωτή RF χρησιμοποιείται. Το τμήμα passband περιλαμβάνει IDFT, κυκλική επέκταση, παράθυρο και μετατόπιση συχνότητας (για τη λειτουργία βασικής ζώνης, η μετατόπιση της συχνότητας ρυθμίζεται στη μεσαία συχνότητα της ζώνης, που συνδέεται με δείκτη δευτερεύοντος φορέα  $N / 2$ ). Ο διαμορφωτής RF περαιτέρω μετατοπίζει το φάσμα στη ζώνη RF, μεταξύ 0,3 GHz και 2,5 GHz.

Η ευέλικτη φόρτιση των δυαδικών ψηφίων στην περιοχή μεταξύ 1 και 12 bits ορίζεται σε όλους τους υπο-φορείς. Η γκρίζα χαρτογράφηση χρησιμοποιείται για όλα τα σημεία σήμανσης φόρτωσης ισοτιμίας και για όλα σχεδόν τα σημεία σήμανσης φορτίων μονών τεμαχίων. Μια συγκεκριμένη φόρτιση bit για κάθε υπο-φορέα κάθε σύνδεσης μπορεί να γίνει αντικείμενο διαπραγμάτευσης μεταξύ του πομπού και του δέκτη, παρέχοντας επαρκή ευελιξία για την υιοθέτηση διαύλων με ευρύ φάσμα αποκρίσεων συχνότητας και PSD θορύβου.

#### 6.8.2.2 Προηγμένη FEC

Ο επιλεγμένος κωδικός QC-LDPC αποτελεί υποσύνολο των κωδικών QC-LDPC που ορίζονται στο IEEE 802.16e (WiMAX) με πέντε συντελεστές κωδικών (1/2, 2/3, 5/6, 16/18 και 20/21) και δύο μεγέθη μπλοκ 120 και 540 byte.



Σχήμα 6.13 Μορφή του πλαισίου μετάδοσης. [28] © 2009 IEEE.

Χρησιμοποιούνται τρεις πίνακες ελέγχου ισοτιμίας για συντελεστές κωδικών 1/2, 2/3 και 5/6, ενώ οι άλλοι δύο υψηλοί κωδικοποιητές επιτυγχάνονται με διάρθρωση του κώδικα ρυθμού 5/6. Το εύρος των ρυθμών κωδικών και των μεγεθών των μπλοκ, μαζί με τις δυνατότητες φόρτωσης των δυαδικών ψηφίων, έχει σχεδιαστεί για να ταιριάζει σε όλους τους τύπους μέσων με τα αντίστοιχα σχήματα αναμετάδοσης: για μέσα με συχνές αναμεταδόσεις, όπως η γραμμή ισχύος, η φόρτιση bit και η FEC μπορούν να βελτιστοποιηθούν (BLER) έως  $10^{-2}$ , ενώ για τα μέσα με σπάνιες αναμετάδοση η βελτιστοποίηση μπορεί να στοχεύσει τη λειτουργία με πολύ χαμηλό BLER, π.χ. στις  $10^{-8}$ . Το κέρδος κωδικοποίησης για τον μέσο όρο BLER  $10^{-3}$  παρουσία πρόσθετου λευκού Gaussian θορύβου (AWGN) ποικίλει από 8,2 dB για κωδικό ρυθμό 16/18 με 1024-QAM σε όλους τους subcarriers έως 9,2 dB για κωδικό ρυθμό 1/2 με QPSK σε όλους τους subcarriers επιτρέποντας στον G.9960 να λειτουργεί αξιόπιστα και αποτελεσματικά σε ευρύ φάσμα χαρακτηριστικών καναλιών και περιβάλλοντα θορύβου. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης σχετικά με την απόδοση του G.9960 FEC για διάφορους κωδικούς ρυθμούς και τον αριθμό επαναλήψεων αποκωδικοποίησης παρουσία AWGN αναφέρονται στο [28].

### 6.8.2.3 Το πλαίσιο

Ένα πλαίσιο μετάδοσης (πλαίσιο PHY) αποτελείται από ένα προοίμιο, κεφαλίδα και ωφέλιμο φορτίο (Σχήμα 6.13). Το προοίμιο αποτελείται από τα τμήματα S1-S3, το καθένα αποτελείται από σύμβολα NS. Σύμβολα του τμήματος S2 ανατρέπονται σε σχέση με τα σύμβολα του S1, σχηματίζοντας ένα σημείο αναφοράς για την ανίχνευση της έναρξης του ληφθέντος πλαισίου. Το παράθυρο εφαρμόζεται στις άκρες κάθε τμήματος για συμβατότητα φάσματος. Η κεφαλίδα μεταφέρει τις ρυθμίσεις όλων των προγραμματιζόμενων παραμέτρων που σχετίζονται με το ωφέλιμο φορτίο, όπως το διάστημα προστασίας, η φόρτιση bit και οι παράμετροι FEC. Οι παράμετροι της κεφαλίδας είναι ενοποιημένες ανά μέσο ώστε να διασφαλίζεται η διαλειτουργικότητα και να επιλέγονται έτσι ώστε να επιτρέπουν την αξιόπιστη ανίχνευση της κεφαλίδας πάνω από θορυβώδη κανάλια, ακόμη και χωρίς εκτίμηση προκαταρκτικού καναλιού. Το ωφέλιμο φορτίο περιλαμβάνει μία ή περισσότερες κωδικές λέξεις FEC. Κάθε κωδική λέξη μεταφέρει ένα τμήμα των μεταδιδόμενων δεδομένων, ένα αναγνωριστικό κεφαλίδας το μεταφερόμενο τμήμα και το CRC για την ανίχνευση των κωδικών λέξεων για την εκλεκτική αναμετάδοση.

### 6.8.2.4 MIMO

Η σύσταση ITU-T G.9963 καθορίζει τον τρόπο προσθήκης στην G.hn μιας δυνατότητας πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO). Οι πομποδέκτες MIMO είναι σε θέση να μεταδίδουν πάνω από τρεις αγωγούς ισχύος (φάσης, ουδέτερου και γης) σε περισσότερες από μία θύρες Tx και να δέχονται σε περισσότερες από μία θύρες Rx, παρέχοντας έτσι αυξημένο ρυθμό δεδομένων και βελτιώνοντας τη συνδεσιμότητα.

## 6.8.3 Επισκόπηση του Layer Link Data του G.hn

### 6.8.3.1 Μέθοδοι πρόσβασης μέσων

Ο G.9960 ορίζει την συγχρονισμένη πρόσβαση πολυμέσων, δηλαδή οι μεταδόσεις στον τομέα συντονίζονται από το DM και συγχρονίζονται με τον κύκλο πρόσβασης Media (MAC). Ο κύκλος MAC, με τη σειρά του, μπορεί να συγχρονιστεί με το δίκτυο - να αντιμετωπίσει την περιοδική χρονικά μεταβαλλόμενη συμπεριφορά απόκρισης καναλιού και θορύβου που προκαλείται από ηλεκτρικές συσκευές και συσκευές συνδεδεμένες στη γραμμή ισχύος. Κάθε κύκλος MAC διαιρείται σε χρονικά διαστήματα που σχετίζονται με τις ευκαιρίες μετάδοσης (TXOP) που εκχωρούνται από το DM για κόμβους στον τομέα. Το DM εκχωρεί τουλάχιστον ένα TXOP για να μεταδώσει το πλαίσιο του Media Access Plan (MAP), το οποίο περιγράφει τα όρια των TXOP που έχουν εκχωρηθεί για έναν ή περισσότερους κύκλους MAC. Η τελευταία

προστατεύει από τα σφάλματα MAP που προκαλούνται κυρίως από τον θόρυβο παλμών. Άλλοι TXOPs εκχωρούνται από το DM σε κόμβους που ζητούν τη μετάδοση δεδομένων εφαρμογής (π.χ. υπηρεσίες βίντεο, υπηρεσίες δεδομένων, VoIP). Όλοι οι κόμβοι στον τομέα συγχρονίζονται με τον κύκλο MAC, διαβάζουν και ερμηνεύουν το MAP και μεταδίδουν μόνο κατά τη διάρκεια των TXOP που τους έχουν ανατεθεί από το DM. Έτσι, οι συγκρούσεις μπορούν να αποφευχθούν για συγκεκριμένες συνδέσεις. Το DM ορίζει τη σειρά, τον τύπο και τη διάρκεια των TXOP βάσει των αιτημάτων από τους κόμβους και του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Το χρονοδιάγραμμα μπορεί να αλλάξει από έναν κύκλο MAC σε άλλο λόγω διακυμάνσεων των μέσων χαρακτηριστικών, στην εφαρμογή χρήστη ή όταν αλλάζει ο αριθμός των κόμβων στον τομέα.

Για την αντιμετώπιση διαφορετικών εφαρμογών, ορίζονται τρεις τύποι TXOP:

- Το TXOP χωρίς περιορισμούς (CFTXOP) υλοποιεί μια πρόσβαση μέσου διαίρεσης χρόνου (TDMA): μόνο ένας κόμβος μπορεί να μεταδώσει κατά τη διάρκεια αυτών των στόχων TXOP - υπηρεσίες με σταθερό εύρος ζώνης και αυστηρό QoS (π.χ. video)
- Το κοινόχρηστο TXOP με τις διαχειριζόμενες χρονικές θυρίδες (STXOP) υλοποιεί μια διαχειριζόμενη αίσθηση φορέα (CSMA / CA), παρόμοια με την ITU-T G.9954 - ευεργετική για υπηρεσίες με ευέλικτο εύρος ζώνης όπου το QoS είναι ένα πρόβλημα (π.χ. VoIP, παιχνίδια, διαδραστικό βίντεο).
- Το TXOP βασισμένο σε συμπύκνωση (CBTXOP) είναι ένα κοινόχρηστο TXOP, στο οποίο ορισμένοι κόμβοι μπορούν να εκχωρηθούν για την υποστήριξη της μετάδοσης με βάση

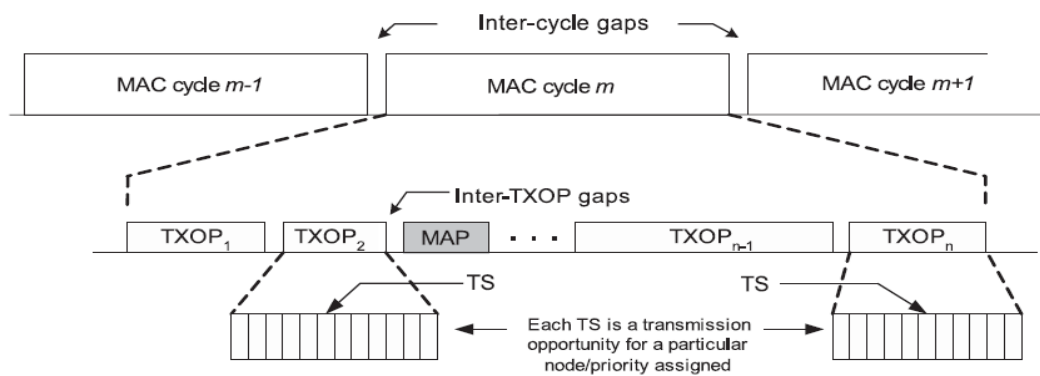
την προτεραιότητα των πλαισίων, παρόμοια με την HomePlug AV [37] - για υπηρεσίες με την καλύτερη δυνατή προσπάθεια με διάφορα επίπεδα προτεραιότητας.

Ένα STXOP διαιρείται σε έναν αριθμό βραχέων χρονικών θυρίδων time slots (TS). Κάθε TS έχει οριστεί για έναν συγκεκριμένο κόμβο για τη μετάδοση ενός πλαισίου με μια συγκεκριμένη προτεραιότητα. Εάν ο κόμβος που έχει εκχωρηθεί για το TS έχει ένα πλαίσιο της εκχωρημένης προτεραιότητας έτοιμο, το μεταδίδει, αλλιώς παραλείπει το TS και μεταβιβάζει την ευκαιρία μετάδοσης στον κόμβο / προτεραιότητα που έχει αντιστοιχιστεί για το επόμενο TS. Ο κόμβος που έχει εκχωρηθεί στο επόμενο TS παρακολουθεί το μέσο (με αισθητήρα φορέα) και περιμένει έως ότου δεν υπάρχει δραστηριότητα στο μέσο. Επομένως, παρά το γεγονός ότι το STXOP μοιράζεται μεταξύ πολλών κόμβων, δεν υπάρχει σύγκρουση εάν η ανίχνευση φορέα είναι επαρκώς αξιόπιστη.

Η μετάδοση κατά τη διάρκεια του CBTXOP ρυθμίζεται από περιόδους σύγκρουσης. Στην αρχή της περιόδου διαμάχης, κάθε κόμβος που υποπίπτει υποδεικνύει την προτεραιότητα του πλαισίου που σκοπεύει να αποστείλει χρησιμοποιώντας την προτεραιότητα σηματοδότησης

(PRS). Το PRS επιλέγει τους κόμβους με πλαίσια με ύψιστη προτεραιότητα: μόνο οι κόμβοι αυτοί μπορούν να αγωνιστούν, ενώ όλοι οι άλλοι επιστρέφουν στην επόμενη περίοδο διαμαρτυρίας. Η πιθανότητα σύγκρουσης μεταξύ των επιλεγμένων κόμβων μειώνεται με τυχαία επιλογή της συγκεκριμένης θυρίδας εκπομπής μέσα στο παράθυρο διαμάχης. Από την αρχή του παραθύρου, όλοι οι επιλεγμένοι κόμβοι παρακολουθούν το μέσο (με αισθητήρα φορέα). Εάν το μέσο είναι αδρανές στην υποδοχή που έχει πάρει ο κόμβος, ο κόμβος μεταδίδει το πλαίσιο του, διαφορετικά αποδίδει την επόμενη περίοδο διαμάχης. Οι περιγραφόμενες αρχές της πρόσβασης μέσων σε G.9960 παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.14.

Για να διευκολυνθεί η ανίχνευση εικονικού φορέα κάθε πλαίσιο υποδεικνύει τη διάρκειά του στην κεφαλίδα πλαισίου. Επίσης, καθορίζονται μηνύματα request-to-send (RTS) και σαφή προς αποστολή (CTS), παρόμοια με τα IEEE 802.11, για να μειωθεί η απώλεια χρόνου σε περίπτωση σύγκρουσης και να βελτιωθεί η λειτουργία παρουσία κρυφών κόμβων.



Σχήμα 6.14 Πρόσβαση πολυμέσων G.9960 (το TXOP1 εκχωρείται ως CFTXOP, TXOP2 και TXOPn ορίζονται ως STXOP και το TXOPn-1 εκχωρείται ως CBTXOP).

### 6.8.3.2 Ασφάλεια

Δεδομένου ότι ο G.9960 προορίζεται να λειτουργεί με κοινόχρηστα μέσα, όπως η ηλεκτρική γραμμή και το coax, το μοντέλο απειλής περιλαμβάνει δύο είδη απειλών: εξωτερικές και εσωτερικές. Και στις δύο περιπτώσεις, ο στόχος είναι να προστατεύονται από εισβολείς με λογικά ισχυρούς υπολογιστικούς πόρους, αλλά χωρίς πρόσβαση σε λειτουργικούς κόμβους.

Η εξωτερική απειλή υπονοεί έναν εισβολέα ικανό να παρακολουθεί τις μεταδόσεις και να στέλνει πλαίσια μέσα στο δίκτυο, αλλά εκτός των διαπιστευτηρίων πρόσβασης στο δίκτυο. Η εσωτερική απειλή είναι από έναν νόμιμο χρήστη του δικτύου, ο οποίος έχει παράνομο συμφέρον στην επικοινωνία άλλου χρήστη ή στην πρόσβαση σε συγκεκριμένο πελάτη δικτύου. Σε περίπτωση κρυφών κόμβων, οι επικοινωνίες μεταξύ δύο συγκεκριμένων κόμβων μπορούν να περάσουν από έναν κόμβο αναμεταδότη, προκαλώντας μια απειλή «άνθρωπος-στη-μέση».

Όσον αφορά τις εξωτερικές απειλές, ο G.9960 ορίζει μια διαδικασία ελέγχου ταυτότητας με βάση τον αλγόριθμο Diffie-Hellman και τον αλγόριθμο Code Counter with Cipher Block

Chaining Message Code (CCM) που χρησιμοποιεί το AES-128. Ενάντια στις εσωτερικές απειλές, χαρακτηριστικές για τις δημόσιες εγκαταστάσεις, ο G.9960 ορίζει την ασφάλεια με ζεύγη, δηλαδή ένα μοναδικό κλειδί κρυπτογράφησης αντιστοιχεί σε κάθε ζεύγος επικοινωνούντων κόμβων και είναι άγνωστο σε όλους τους άλλους κόμβους. Η ασφάλεια των ζευγαριών διατηρεί την εμπιστευτικότητα μεταξύ των χρηστών εντός του δικτύου και δημιουργεί ένα άλλο επίπεδο προστασίας από έναν εισβολέα που έχει σπάσει μέσω του ελέγχου εισαγωγής δικτύου. Ο αναμενόμενος βαθμός ασφαλείας στο G.9960 είναι ο ίδιος ή ισχυρότερος από αυτόν που ορίζεται στην πιο πρόσφατη προδιαγραφή για το WLAN IEEE 802.11n.

Τα παραπάνω ζητήματα που σχετίζονται με την παράδοση περιεχομένου πολυμέσων, τα οποία παρουσιάζονται τόσο καλά με VoIP και IPTV, μπορούν να επεκταθούν και να κλιμακωθούν για άλλα υπάρχοντα και αναδυόμενα περιεχόμενα πολυμέσων, όπως η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας, τηλεδιάσκεψη πολυμέσων υψηλής πιστότητας, πολυμέσα κ.λπ.



## 6.9 Αναφορές

1. Y.-J. Lin, H. A. Latchman, M. Lee, and S. Katar, A power line communication network infrastructure for the smart home, *IEEE Wireless Commun.*, 9(6), 104–111, Dec. 2002.
2. H. A. Latchman, K. H. Afkhamie, S. Katar, R. E. Newman, B. Mashburn, and L. Yonge, High speed multimedia home networking over powerline, in *Nat. Cable Telecommun. Assoc. Nat. Show Tech. Papers*, San Francisco, USA, Apr. 3–5, 2005, 9–22.
3. M. K. Lee, R. E. Newman, H. A. Latchman, S. Katar, and L. Yonge, HomePlug 1.0 powerline communication LANs – Protocol description and performance results, *Int. J. Commun. Syst., Special Issue: Powerline Commun. and Applic.*, 16(5), 447–473, May 2003.
4. Current Technologies, Sep. 2008. [Online]. Available: <http://www.currenttechnologies.com>
5. Y.-J. Lin, H. A. Latchman, S. Katar, and M. K. Lee, A comparative performance study of wireless and power line networks, *IEEE Commun. Mag.*, 41(4), 54–63, Apr. 2003.
6. M. K. Lee, H. A. Latchman, R. E. Newman, S. Katar, and L. Yonge, Field performance comparison of IEEE 802.11b and HomePlug 1.0, in *Proc. IEEE Conf. Local Comput. Netw.*, Tampa, USA, Nov. 6–8, 2002, 598–599.
7. E. Mikoczy, D. Sivchenko, B. Xu, and J. I. Moreno, IPTV services over IMS: Architecture and standardization, *IEEE Commun. Mag.*, 46(5), 128–135, May 2008.
8. B. Ji, A. Rao, M. Lee, H. A. Latchman, and S. Katar, Multimedia in home networking, in *Proc. Int. Conf. Cybern. Inform. Technol., Syst. Applic.*, vol. 1, Orlando, USA, Jul. 21–25, 2004, 397–404.
9. 802.11n: Next-generation wireless LAN technology, Broadcom Corporation, White paper, Apr. 2006. [Online]. Available: [https://www.broadcom.com/collateral/wp/802\\_11n-WP100-R.pdf](https://www.broadcom.com/collateral/wp/802_11n-WP100-R.pdf)
10. Ultra-wideband (UWB) technology: Enabling high-speed wireless personal area networks, Intel Corporation, Ultra-Wideband (UWB) White Paper, 2004. [Online]. Available: <http://www.intel.com/technology/comms/uwb/>
11. A. Monk, S. Palm, A. Garrett, R. Lee, and R. Leacock, MoCA Protocols: What exactly is this MoCA thing? MoCA Alliance, Tech. Rep., Nov. 2007. [Online]. Available: <http://www.mocalliance.org>
12. HomePNA and IPTV, HomePNA Alliance, Website, Apr. 2007. [Online]. Available: <http://www.homepna.org>
13. J. S. Barnes, A physical multi-path model for powerline distribution network propagation, in *Proc. Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Tokyo, Japan, Mar. 24–26, 1998, 76–89.
14. K. Dostert, Telecommunications over the power distribution grid – possibilities and limitations, in *Proc. Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Essen, Germany, Apr. 2–4, 1997, 1–9.
15. H. Hrasnica, A. Haidine, and R. Lehnert, *Broadband Powerline Communications: Network Design*. John Wiley & Sons, 2004.
16. OPERA Technology White Paper, Open PLC European Research Alliance, Tech. Rep., Jul. 2007. [Online]. Available: <http://www.ist-opera.org>
17. HD PLC White Paper, HD-PLC Alliance, Tech. Rep., Nov. 2005. [Online]. Available: <http://www.hd-plc.org>
18. HomePlug AV White Paper, HomePlug Powerline Alliance, Tech. Rep., Aug. 2005. [Online]. Available: <http://www.homeplug.org>
19. K. H. Afkhamie, S. Katar, L. Yonge, and R. E. Newman, An overview of the upcoming HomePlug AV standard, in *Proc. IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Vancouver, Canada, Apr. 6–8, 2005, 400–404.
20. IEEE 1901 Working Group. [Online]. Available: <http://grouper.ieee.org/groups/1901>
21. IEEE P1901, Standard for broadband over power line networks: Medium access control and physical layer specifications. [Online]. Available: <http://grouper.ieee.org/groups/1901/index.html>
22. S. Galli and O. Logvinov, Recent developments in the standardization of power line communications within the IEEE, *IEEE Commun. Mag.*, 46(7), 64–71, Jul. 2008.
23. Unified high-speed wire-line based home networking transceivers – system architecture and physical layer specification, ITU-T, Recommendation G.9960, 2011. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9960>
24. Unified high-speed wire-line based home networking transceivers – data link layer specification, ITU-T, Recommendation G.9961, 2014. [Online]. Available: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9961>
25. Unified high-speed wire-line based home networking transceivers – management specification, ITU-T, Recommendation G.9962, 2013.
26. Unified high-speed wire-line based home networking transceivers – multiple input/multiple output specification, ITU-T, Recommendation G.9963, 2011.
27. Unified high-speed wire-line based home networking transceivers – specification of spectrum related components, ITU-T, Recommendation G.9964, 2011.
28. V. Oksman and S. Galli, G.hn: The new ITU-T home networking standard, *IEEE Commun. Mag.*, 47(10), 138–145, Oct. 2009.
29. Coexistence mechanism for wireline home networking transceivers, ITU-T, Recommendation G.9972, 2010.
30. S. Galli, A. Kurobe, and M. Ohura, The Inter-PHY protocol (IPP): A simple co-existence protocol for shared

- media, in *Proc. IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Dresden, Germany, Mar. 30–Apr. 1, 2009, 194–200.
31. S. Galli, H. Koga, and N. Kodama, Advanced signal processing for PLCs: Wavelet-OFDM, in *Proc. IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Jeju Island, Korea, Apr. 2–4, 2008, 187–192.
  32. H. C. Ferreira, L. Lampe, J. E. Newbury, and T. G. Swart, Eds., *Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines*, 1st ed. John Wiley & Sons, Hoboken, 2010.
  33. D. Ayyagari and W.-C. Chan, A coordination and bandwidth sharing method for multiple interfering neighbor networks, in *Proc. IEEE Consum. Commun. Netw. Conf.*, Las Vegas, USA, Jan. 3–6, 2005, 206–210.
  34. S. Katar, B. Mashburn, K. Afkhamie, H. Latchman, and R. Newman, Channel adaptation based on cyclo-stationary noise characteristics in PLC systems, in *Proc. IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Orlando, USA, Mar. 26–29, 2006, 16–21.
  35. S. Katar, L. Yonge, R. Newman, and H. Latchman, Efficient framing and ARQ for high-speed PLC systems, in *Proc. IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Applic.*, Vancouver, Canada, Apr. 6–8, 2005, 27–31.
  36. H. A. Latchman, S. Katar, L. W. Yonge, and S. Gavette, *HomePlug AV and IEEE 1901: A Handbook for PLC Designers and Users*. Wiley-IEEE Press, 2013.
  37. HomePlug Power line Alliance. [Online]. Available: <http://www.homeplug.org/>
  38. Power Line Communications Principles Standards and Applications from Multimedia to Smart Grid By Lutz Lampe and Andrea M Tonello and Theo G Swart.

## Κεφάλαιο 7 : Συμπεράσματα

Οι επικοινωνίες γραμμής ισχύος (PLC) είναι αναμφισβήτητα ένα θέμα με πολλές πτυχές. Από την προοπτική της επικοινωνίας, υπάρχουν αξιοσημείωτες ομοιότητες με τις ασύρματες επικοινωνίες. Όντας μια τεχνική επαναχρησιμοποίησης, η διάδοση του σήματος και το περιβάλλον θορύβου είναι σημαντικοί παράγοντες και συνήθως δεν υπόκειται στον έλεγχο του σχεδιαστή του συστήματος επικοινωνιών. Όμως, σαν ένα μέσο καλωδίωσης, έχει ένα ορισμένο προσδιορισμό της προώθησης του σήματος καθώς και μια υψηλή διείσδυση, π.χ. σε εσωτερικά περιβάλλοντα. Το PLC είναι μοναδικό μεταξύ των τεχνολογιών επικοινωνίας δεδομένου ότι το σήμα επικοινωνίας υπερτίθεται σε ένα σήμα σχετικά υψηλότερης τάσης, το οποίο με τη σειρά του απαιτεί προστασία του εξοπλισμού επικοινωνίας. Αυτό, καθώς και η κατανόηση των χαρακτηριστικών του μέσου επικοινωνίας, απαιτούν εξειδίκευση στο σχεδιασμό, την ανάλυση και την ανάπτυξη συστημάτων PLC. Από τη σκοπιά της εφαρμογής και της επιχείρησης, το PLC γνώρισε ένα μακρύ ταξίδι από την αρχική του χρήση από εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας στη βιομηχανία και τον αυτοματισμό στο σπίτι μέχρι την πρόσβαση στο Internet και την επικοινωνία πολυμέσων και το πρόσφατο ανανεωμένο ενδιαφέρον για σύγχρονες λύσεις PLC για εφαρμογές έξυπνων δικτύων. Τελευταία έχουν εμφανιστεί σημαντικές καινοτομίες, τις οποίες αναμένεται να συνεχιστούν ειδικά στο πλαίσιο της μοναδικής ιδιοκτησίας του PLC μέσω του δικτύου.

Ο χαρακτηρισμός του καναλιού, που καλύπτεται Κεφάλαιο 2, είναι στο επίκεντρο της κατανόησης και του σχεδιασμού συστημάτων επικοινωνιών μέσω γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Παρουσιάστηκαν διαφορετικές προσεγγίσεις για το χαρακτηρισμό του καναλιού ηλεκτρικής γραμμής που χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν. Τα μοντέλα για τις αποκρίσεις συχνότητας καναλιών που προκύπτουν από τις φαινομενολογικές προσεγγίσεις δείχνουν ορισμένες ομοιότητες με τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στις ασύρματες επικοινωνίες. Σημαντική πρόοδος σημειώθηκε επίσης στον τομέα της μοντελοποίησης του θορύβου. Ωστόσο, απαιτούνται περαιτέρω ερευνητικές προσπάθειες για την ενοποίηση τυποποιημένων μοντέλων καναλιών που ισχύουν για τους διαφορετικούς τομείς δικτύων και τους τύπους συστημάτων PLC.

Μία από τις μεγάλες προκλήσεις για την ευρεία αποδοχή του PLC έγκειται σε ζητήματα γύρω από την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC), τα οποία έχουν συζητηθεί στο Κεφάλαιο 3. Λόγω της φύσης των εγκαταστάσεων ηλεκτρικού ρεύματος που δεν έχουν κατασκευαστεί για την πρόληψη της ακτινοβολίας, Τα συστήματα PLC που προκαλούν επιβλαβείς παρεμβολές στις ραδιοφωνικές υπηρεσίες υπήρξαν από τότε ασυμβίβαστα. Αυτές οι ανησυχίες σχετίζονται κυρίως με την ευρυζωνική PLC και οι πρόσφατες προσπάθειες ρύθμισης, ιδίως στην Ευρώπη,

θα βοηθήσουν στην εξασφάλιση βεβαιότητας σχετικά με τα όρια εκπομπών. Ομοίως, η ανάπτυξη των γνωστικών ιδεών μετάδοσης παρέχει συστήματα PLC με την ικανότητα να προσαρμόζονται στις ποικίλες απαιτήσεις EMC. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις που προκύπτουν από την εκπομπή ηλεκτρονικών συσκευών που δεν είναι PLC, ειδικά στις ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται από το PLC στενής ζώνης.

Όπως προαναφέρθηκε, τα συστήματα επικοινωνίας και ισχύος λειτουργούν σε πολύ διαφορετικά επίπεδα τάσης και ισχύος. Επομένως, δεν μπορούν απλά να διασυνδεθούν. Το κεφάλαιο 4 παρουσίασε τις αρχές της σύζευξης, συμπεριλαμβανομένων των κυκλωμάτων σύζευξης και την ανάλυσή τους και τις προσεγγίσεις τους. Οι λύσεις χαμηλής απώλειας, μικρού μεγέθους και προσαρμοστικής σύζευξης που παρέχουν επαρκή προστασία τόσο στον άνθρωπο όσο και στα μόντεμ που συνδέονται με τον συζεύκτη θα παραμείνουν ένα σημαντικό θέμα έρευνας και ανάπτυξης.

Η κάλυψη στα Κεφάλαια 5 και 6 περιελάμβανε την αυτοματοποίηση οικιακών και βιομηχανικών εφαρμογών, στην οποία το PLC διαδραμάτισε εδώ και πολύ καιρό σημαντικό ρόλο, τα συστήματα πολυμέσων PLC, για τα οποία το ευρυζωνικό PLC έχει γίνει μια επίσημη λύση και εναλλακτική λύση και επέκταση για ασύρματα συστήματα. Το PLC ήταν η αρχική και κατά κάποιον τρόπο "οργανική" επιλογή και τελικά η επικοινωνία των οχημάτων, που είναι ένα από τα παραδείγματα του PLC σε γραμμές συνεχούς ρεύματος. Μεγάλο μέρος του ενδιαφέροντος και της ενοποίησης σύγχρονων συστημάτων ευρυζωνικών επικοινωνιών και υψηλής ταχύτητας δεδομένων στενής ζώνης μπορεί να φανεί από τον κατάλογο βιομηχανικών και διεθνών προτύπων PLC που έχουν αναπτυχθεί και εγκριθεί τα τελευταία 10 χρόνια, ειδικά για εφαρμογές πολυμέσων και έξυπνου δικτύου σενάρια. Αναμένουμε ότι τα πρότυπα αυτά θα εξελιχθούν περαιτέρω λαμβάνοντας υπόψη, για παράδειγμα, τις επικαιροποιήσεις των κανονισμών και τις βελτιωμένες τεχνικές μετάδοσης και πρόσβασης.

Συμπερασματικά, το PLC είναι μια ώριμη τεχνολογία που έχει βιώσει σημαντικές καινοτομίες ειδικά κατά τα τελευταία 20 χρόνια. Εξυπηρετεί ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όχι σε αντίθεση με τις ασύρματες επικοινωνίες. Οι καινοτομίες της τεχνολογίας μπορούν και πρέπει να αντιμετωπίζουν την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα της επικοινωνίας και ενόψει των αλλαγών στο περιβάλλον μετάδοσης εξαιτίας του πολλαπλασιασμού νέων τύπων ηλεκτρονικών φορτίων.

**ΙΟΥΝΙΟΣ 2018**

—