



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών

**Μελέτη της απόδοσης πρωτοκόλλου πρόσβασης στο
μέσο σε δίκτυα LoRaWAN**

Διπλωματική Εργασία
Σιταρίδης Παναγιώτης
10249

Επιβλέπων Καθηγητής: Πέτρος Νικοπολιτίδης

Θεσσαλονίκη, Οκτώβριος 2024

Ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνω 5 ανεκτίμητα χρόνια φοίτησης μου στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Α.Π.Θ., όπου εξελίχθηκα σε γνωστικό και προσωπικό επίπεδο.

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στον κ. Πέτρο Νικοπολιτίδη, Καθηγητή του τμήματος Πληροφορικής Α.Π.Θ. για την συνεργασία και την πολύτιμη καθοδήγησή του καθ' όλη την διάρκεια αυτής της έρευνας, όπως και στον Μεταδιδάκτορα κ. Αναστάσιο Βαλκάνη για την συμβουλευτική του συνεισφορά στο πρακτικό μέρος της εργασίας.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια, τους φίλους και την σύντροφό μου που με στήριξαν και με ενθάρρυναν με κάθε τρόπο, ώστε να μπορέσω να δώσω τον καλύτερό μου εαυτό.

Περίληψη

Στην παρακάτω εργασία μελετάται η λειτουργία των δικτύων LoRaWAN και αναλύεται η γενικότερη μεθοδολογία πίσω από την υλοποίηση προσομοιώσεων σε επίπεδο ζεύξης, σύμφωνα με τα πρότυπα που πρεσβεύουν τα ανάλογα πρωτόκολλα και η επιστημονική βιβλιογραφία. Αρχικά, γίνεται μία εισαγωγή στα συστήματα IoT και στις προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο τεχνολογικός αυτός κλάδος. Έπειτα, παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο γύρω από τα δίκτυα LoRaWAN ξεκινώντας με μία πιο γενική οπτική της λειτουργίας του δικτύου, δίνοντας έμφαση στην τοπολογία, την διαστρωμάτωση και την ασφάλεια που τα διακατέχει. Συνεχίζοντας, αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο δομείται η πληροφορία στα διαφορετικά ομότιμα επίπεδα διαστρωμάτωσης, ενώ παράλληλα τίθενται περιορισμοί γύρω από χρήσιμες παραμέτρους για την υλοποίηση προσομοιώσεων αυτού του τύπου. Βασικότερο κομμάτι της εργασίας αποτελεί η ενότητα της προσομοίωσης, ως το πρακτικό μέρος. Εκεί αναπτύσσεται ένα πλασματικό δίκτυο LoRaWAN μεταβλητής τηλεπικοινωνιακής συμφόρησης και μέσα από ορισμένες μετρικές εξάγονται αποτελέσματα για την απόδοσή του σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Παράλληλα σε κάθε στάδιο εξηγείται αλγοριθμικά η μεθοδολογία για τη διαχείριση των ζητημάτων που προκύπτουν κατά την διάρκειά της. Τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματα της απόδοσης των δικτύων, αξιολογείται η προκύπτουσα συμπεριφορά και επαληθεύεται η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων με αντίστοιχα στην υπάρχουσα επιστημονική βιβλιογραφία.

Abstract

This thesis studies the operation of LoRaWAN networks and analyzes the general methodology behind the implementation of link-level simulations, according to the standards upheld by the relevant protocols and scientific literature. It begins with an introduction to IoT systems, and the challenges faced by this technological field. Then, the theoretical background of LoRaWAN networks is presented, starting with a broader perspective on network operations, emphasizing topology, layering, and security aspects. The paper continues analyzing the way information is structured across the different network layers, while also addressing constraints around useful parameters for implementing such simulations. A key part of the thesis is the simulation section, which serves as the practical component. A simulated LoRaWAN network is developed, with variable traffic congestion, and performance results are derived under different operating conditions, using specific metrics. At each stage, the methodology is explained for addressing issues arising during the simulation algorithmically. The final section presents the network performance results, evaluates the resulting behavior, and verifies the validity of the results by comparing them with those in the existing scientific literature.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	I
Περίληψη	II
Abstract.....	III
Περιεχόμενα.....	IV
Κατάλογος Εικόνων	VI
Κατάλογος Πινάκων	VIII
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	1
1.1. Συστήματα IoT.....	1
1.2. LPWANs	2
1.2.1. Πλεονεκτήματα LPWANs.....	2
1.2.2. Απαιτήσεις LPWANs	3
1.3. Στόχος εργασίας.....	5
Κεφάλαιο 2: LoRaWAN	6
2.1. Διαστρωμάτωση.....	6
2.2. Τοπολογία δικτύου LoRaWAN	7
2.3. Λειτουργία δικτύου LoRaWAN	9
2.4. Ασφάλεια στο LoRaWAN.....	10
2.5. Σύγκριση LoRaWAN με άλλα LPWANs.....	13
2.6. Φυσικό Επίπεδο	15
2.6.1. Διαμόρφωση και CSS	15
2.6.2. Υπολογισμός βασικών παραμέτρων	17
2.7. Επίπεδο Ζεύξης.....	21
2.7.1. Κλάσεις	21
2.7.2. Δομή Πακέτου LoRa.....	23
2.7.3. Επικοινωνία με Pure Aloha.....	28
Κεφάλαιο 3: Προσομοίωση.....	35
3.1. Χρήση Python.....	35
3.2. Περιγραφή συστήματος	37
3.3. Παραδοχές	38

3.4. Υλοποίηση Προσομοίωσης.....	40
3.4.1. Οντότητες προσομοιωτή.....	40
3.4.2. Πιθανές καταστάσεις των κόμβων.....	41
3.4.2. Προσδιορισμός παραμέτρων και αρχικοποίηση μεταβλητών	42
3.4.3. Βασικός Βρόγχος επανάληψης	45
3.4.4. Επιλογή κόμβων προς μετάδοση	45
3.4.5. Έλεγχος για συγκρούσεις.....	46
3.4.6. Έλεγχος για το τέλος μετάδοσης	46
3.4.7. Έλεγχος επιτυχούς μετάδοσης	47
3.4.8. Ενημέρωση των μετρικών επίδοσης.....	47
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα και Συζήτηση	50
4.1. Μετρήσεις για SF6.....	50
4.2. Μετρήσεις για SF12.....	58
4.3. Σύγκριση Απόδοσης SF6 και SF12.....	65
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και σημεία μελλοντικής διερεύνησης ..	67
Βιβλιογραφία	68

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Διαστρωμάτωση στο LoRaWAN.....	6
Εικόνα 2: Τοπολογία δικτύου LoRaWAN[9].....	7
Εικόνα 3: Ασφάλεια στο LoRaWAN[10].....	10
Εικόνα 4: Χαρακτηριστικά των πιο γνωστών LPWANs [5].....	13
Εικόνα 5: Χαρακτηριστικά Δικτύων Sigfox, LoRaWAN, NB-IoT[8].....	13
Εικόνα 6: The Things Network[12]	14
Εικόνα 7: Σήματα Chirp[14].....	16
Εικόνα 8: Λειτουργία συσκευής LoRa κλάσης A[18]	21
Εικόνα 9: Λειτουργία συσκευής LoRa κλάσης B[18]	22
Εικόνα 10: Λειτουργία συσκευής LoRa κλάσης C[18]	22
Εικόνα 11: Δομή πακέτου LoRa	23
Εικόνα 12: Μετάδοση πακέτου με Pure Aloha.....	29
Εικόνα 13: Οριακή επιτυχημένη μετάδοση Pure Aloha	30
Εικόνα 14: Σύγκρουση πακέτων σε Pure Aloha.....	30
Εικόνα 15: Διεκπεραιωτική ικανότητα Pure Aloha	34
Εικόνα 16: Σχηματικό Διάγραμμα της Προσομοίωσης	49
Εικόνα 17: Αποτελέσματα για SF6	50
Εικόνα 18: Τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση για SF6	51
Εικόνα 19: Διεκπεραιωτική ικανότητα, συναρτήσει της συμφόρησης για SF6	51
Εικόνα 20: Διεκπεραιωτική ικανότητα συναρτήσει του πλήθους κόμβων για SF6.....	52
Εικόνα 21: Αναλογία συγκρούσεων για SF6	53
Εικόνα 22: Πλήθος κόμβων σε κάθε κατάσταση για SF6	53
Εικόνα 23: Πλήθος των κόμβων που επιλέχθηκαν προς μετάδοση για SF6	54
Εικόνα 24: Αποτελέσματα για SF6 με συμβολή των πακέτων επιβεβαίωσης.....	55
Εικόνα 25: Διεκπεραιωτική ικανότητα συναρτήσει της συμφόρησης για SF6, με συμβολή των πακέτων επιβεβαίωσης	55
Εικόνα 26: Διεκπεραιωτική ικανότητα συναρτήσει του πλήθους κόμβων για SF6, με συμβολή των πακέτων επιβεβαίωσης	56
Εικόνα 27: Αποτελέσματα για SF6 από το [19]... ..	56
Εικόνα 28: Αποτελέσματα για SF12	58
Εικόνα 29: Τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση για SF12	58

Εικόνα 30: Διεκπεραιωτική ικανότητα συναρτήσει της συμφόρησης για SF12	59
Εικόνα 31: Διεκπεραιωτική ικανότητα συναρτήσει του πλήθους κόμβων για SF12...	60
Εικόνα 32: Λόγος συγκρούσεων για SF12	60
Εικόνα 33: Πλήθος των κόμβων σε κάθε κατάσταση για SF12	61
Εικόνα 34: Πλήθος των κόμβων που επιλέχθηκαν προς μετάδοση για SF12	62
Εικόνα 35: Αποτελέσματα για SF12, με συμβολή των πακέτων επιβεβαίωσης.....	62
Εικόνα 36: Διεκπεραιωτική ικανότητα συναρτήσει της συμφόρησης για SF12	63
Εικόνα 37: Διεκπεραιωτική ικανότητα συναρτήσει του πλήθους κόμβων για SF12...	63
Εικόνα 38: Αποτελέσματα για SF12 από το [19].....	64
Εικόνα 39: Ευάλωτο διάστημα προς σύγκρουση για SF6	65
Εικόνα 40: Ευάλωτο διάστημα προς σύγκρουση για SF12	66

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας I: Αναλογία Κωδικοποίησης LoRa	18
Πίνακας II: Δομή πακέτου LoRa στο Φυσικό Επίπεδο[7].....	23
Πίνακας III: Δομή πεδίου PHY Payload[7]	25
Πίνακας IV: Δομή MHDR[7]	25
Πίνακας V: Πιθανές τιμές του πεδίου FType[7]	25
Πίνακας VI: Δομή του MAC Payload[7].....	26
Πίνακας VII: Δομή του πεδίου FHDR[7]	26
Πίνακας VIII: Δομή του πεδίου FCtrl-Downlink[7].....	27
Πίνακας IX: Δομή του πεδίου FCtrl-Uplink[7]	28
Πίνακας X: Κανονισμοί Duty Cycle.....	38
Πίνακας XI: Παράμετροι διαμόρφωσης	42
Πίνακας XII: Χρονικές παράμετροι.....	44

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1. Συστήματα IoT

Το Internet of Things(IoT) αποτελεί μία από τις πιο καινοτόμες και σημαντικές τεχνολογίες της σύγχρονης εποχής και έχει αρχίσει να αλλάζει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούμε με το περιβάλλον μας. Η δυνατότητα των καθημερινών αντικειμένων να συνδέονται στο διαδίκτυο και να επικοινωνούν μεταξύ τους, δημιουργεί ένα δίκτυο διασυνδεδεμένων συσκευών που μπορούν να ανταλλάσσουν δεδομένα και να λαμβάνουν αποφάσεις με ελάχιστη ή καθόλου ανθρώπινη παρέμβαση. Αυτή η τεχνολογία έχει εφαρμογές σε ποικίλα πεδία όπως ο τομέας της υγείας[1] με την δημιουργία συστημάτων αυτόματης παρακολούθησης ασθενών, την διαχείριση ιατρικού εξοπλισμού και την ενημέρωση για την διαθεσιμότητα των πρώτων υλών, ο τομέας της βιομηχανίας[2] με την παρακολούθηση και την αυτόματη βελτιστοποίηση της απόδοσης της παραγωγής, η μετάβαση στις «έξυπνες» πόλεις[3] με την ρύθμιση της οδικής κυκλοφορίας, ο τομέας της γεωργίας[4] με τον απομακρυσμένο και αυτόνομο καθορισμό των συνθηκών στις καλλιέργειες.

Παρά τη μεγάλη τους δυναμική, τα συστήματα IoT αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις, ιδιαίτερα στον τομέα της επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών και δημιουργείται ανάγκη για αξιόπιστους και αποτελεσματικούς τρόπους αλληλεπίδρασης μεταξύ τους. Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες, όπως το Wi-Fi και τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, δεν είναι πάντα κατάλληλες για την εξυπηρέτηση των απαιτήσεων κάθε εφαρμογής. Τα βασικά ζητήματα που προκύπτουν περιλαμβάνουν την ενεργειακή αποδοτικότητα την εμβέλεια επικοινωνίας, το κόστος, και την ικανότητα διαχείρισης μεγάλου αριθμού συσκευών.

1.2. LPWANs

1.2.1. Πλεονεκτήματα LPWANs

Τα συστήματα IoT επιστρατεύουν πολύ συχνά δίκτυα LPWANs (Low-Power-Wide-Area-Networks) στην λειτουργία τους, καθώς αυτά ανταποκρίνονται πολύ αποτελεσματικά στις συγκεκριμένες προδιαγραφές. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με το [5] τα δίκτυα τύπου LPWAN εισάγουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα στον χώρο του IoT. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μικρής εμβέλειας, ο στόχος σχεδιασμού των LPWAN είναι η **κάλυψη ευρείας περιοχής** με χαμηλή ισχύ και χαμηλό κόστος. Τα περισσότερα LPWAN σχηματίζουν τοπολογία αστέρα όπου οι συσκευές επικοινωνούν άμεσα με το σταθμό βάσης (BS). Με εξαίρεση το RPMA (2,4GHz), τα περισσότερα μη κυψελοειδή LPWAN λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες (ζώνη κάτω του 1 GHz) που παρέχουν μεγάλη εμβέλεια επικοινωνίας (από μερικά χιλιόμετρα σε αστικές περιοχές έως δεκάδες χιλιόμετρα σε αγροτικές περιοχές). Ως γνωστόν, οι χαμηλότερες συχνότητες έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά διάδοσης μέσα από εμπόδια. Αυτές οι ιδιότητες έκαναν τη ζώνη κάτω του 1 GHz ελκυστική για τις τεχνολογίες LPWAN.

Οι συσκευές IoT αναμένεται να λειτουργούν για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα (αρκετά χρόνια) χωρίς να χρειάζεται αντικατάσταση της μπαταρίας. Τα LPWAN επιτυγχάνουν λειτουργία **χαμηλής κατανάλωσης ισχύος** χρησιμοποιώντας διάφορες προσεγγίσεις: Πρώτον, η τοπολογία αστέρα στην αρχιτεκτονική τους εξαλείφει την ενέργεια που καταναλώνεται μέσω της δρομολόγησης πακέτων σε δίκτυα πολλαπλών διαδρομών. Δεύτερον, διατηρούν τον σχεδιασμό των κόμβων απλό, μεταφέροντας τις πολυπλοκότητες στον BS. Τρίτον, όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιώντας κανάλια στενής ζώνης, μειώνεται το επίπεδο θορύβου και επεκτείνεται η εμβέλεια μετάδοσης χωρίς να χρειάζεται αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος του σήματος.

Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας που συνέβαλε στην άνοδο των LPWANs είναι το **χαμηλό κόστος** τους. Τα μη κυψελοειδή LPWANs δεν απαιτούν καμία (ή περιορισμένη) υποδομή και λειτουργούν σε ελεύθερο φάσμα, παρέχοντας μια εξαιρετική εναλλακτική λύση σε σχέση με το κυψελοειδές δίκτυο. Επιπλέον, η πρόοδος στο σχεδιασμό του υλικού και η απλότητα των τελικών συσκευών LPWAN καθιστούν το δίκτυο οικονομικά βιώσιμο.

Τα LPWAN έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν αξιόπιστες και ισχυρές επικοινωνίες. Τα περισσότερα υιοθετούν κατάλληλες τεχνικές διαμόρφωσης και τεχνικές διασποράς φάσματος για να αυξήσουν την αντοχή του σήματος στις παρεμβολές και να παρέχουν ένα επίπεδο ασφάλειας. Στην εξάπλωση φάσματος, το σήμα στενής ζώνης εξαπλώνεται στο πεδίο της συχνότητας με την ίδια πυκνότητα ισχύος με αποτέλεσμα να προκύπτει ένα σήμα μεγαλύτερου εύρους ζώνης.

Η αποφυγή της τοπολογίας πολλαπλών διαδρομών δίνει μεγάλες δυνατότητες για την κλιμάκωση των LPWAN. Επιπρόσθετα, τα LPWANs χρησιμοποιούν δίκτυα στενής ζώνης για την υποστήριξη μαζικού αριθμού συσκευών ώστε να αξιοποιείται αποτελεσματικά το περιορισμένο φάσμα. Ορισμένα LPWANs (π.χ. LoRaWAN) χρησιμοποιούν συστήματα πολλαπλών κεραιών για να επιτρέπουν στο BS να υποστηρίξει μεγάλο αριθμό κόμβων. Ορισμένα υιοθετούν μαζικά παράλληλες επικοινωνίες και προς τις δύο κατευθύνσεις χρησιμοποιώντας σύστημα μίας κεραίας, παρέχοντας έτσι δυνατότητες κλιμάκωσης. Η κλιμάκωση του LPWAN επηρεάζεται επίσης από διάφορους παράγοντες, όπως το υποκείμενο πρωτόκολλο MAC (media access control), ο κύκλος λειτουργίας και η απαίτηση αξιοπιστίας.

1.2.2. Απαιτήσεις LPWANs

Ως προς την εφαρμογή, τα LPWAN καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα, ωστόσο σύμφωνα με το [6] για να λειτουργούν αποτελεσματικά στον χώρο του IoT υπάρχουν κάποιες κοινές απαιτήσεις που πρέπει να καθοδηγούν το σχεδιασμό κάθε δικτύου τέτοιου τύπου.

Αρχικά, για την λειτουργία των συσκευών με εξαιρετικά χαμηλή ισχύ είναι απαραίτητο οι εντάσεις ρεύματος να παραμένουν σε χαμηλές τιμές και συγκεκριμένα, όσον αφορά τις πιο διαδεδομένες μπαταρίες τύπου κυψέλης κέρματος, τίθεται ένα άνω όριο στα 30-50mA, γεγονός που σημαίνει ότι η επίτευξη της απαιτούμενης εμβέλειας μέσω υψηλής ισχύος εξόδου RF(Radio-Frequency) πρέπει να αποφευχθεί.

Όσον αφορά τους οικονομικούς περιορισμούς, αποτελούν ισχυρό κίνητρο, και οι εγκαταστάσεις πρέπει να είναι οικονομικά προσιτές για να γίνουν αποδεκτές από πολλά συστήματα. Αυτό συνεπάγεται την χρήση συσκευών χαμηλού κόστους, χωρίς κάρτα SIM και πρέπει να επιδιώκουν εύκολη εγκατάσταση δικτύου με ελάχιστη συντήρηση.

Η πολυπλοκότητα του υλικού και του λογισμικού χρειάζεται να παραμείνει πολύ περιορισμένη, δηλαδή με απλές αρχιτεκτονικές και απλά πρωτόκολλα.

Το επίπεδο δραστηριότητας μπορεί να διαφέρει από εφαρμογή σε εφαρμογή, αλλά για να περιοριστεί η κατανάλωση ενέργειας, το δίκτυο δεν θα πρέπει να απαιτεί την αφύπνιση του αντικειμένου, εκτός εάν υπάρχει ανάγκη αποστολής ή λήψης δεδομένων.

Η υποδομή του δικτύου πρέπει να είναι εύκολη στην ανάπτυξη σε εθνικό επίπεδο, με καλή συνολική κάλυψη και δυνατότητα μετακίνησης μεταξύ χωρών. Η προσθήκη υποδομής και η προσθήκη ενός νέου αντικειμένου στο δίκτυο πρέπει να είναι απλές διαδικασίες. Το πρωτόκολλο πρέπει να ευθυγραμμίζεται με κάποιο είδος πρότυπο για να μεγιστοποιηθεί η διαθεσιμότητα των αντικειμένων και η απρόσκοπτη συνδεσιμότητα. Ένας αποδοτικός σύνδεσμος λήψης είναι ευπρόσδεκτος για την αποτελεσματική διαχείριση του δικτύου, για παράδειγμα μέσω του Adaptive Data Rate (ADR) ή του Transmit Power Control (TPC).

Η μεταφορά δεδομένων μεταξύ του αντικειμένου και του τελικού χρήστη πρέπει να είναι πλήρως ασφαλής. Ο διαχειριστής του δικτύου δεν πρέπει να έχει πρόσβαση σε σημαντικά δεδομένα. Ως μέρος της ασφάλειας, ο σύνδεσμος RF πρέπει επίσης να είναι ανθεκτικός στις παρεμβολές.

Οι συσκευές γενικά δεν κινούνται ή κινούνται αργά, αλλά μπορεί να βρίσκονται σε περιβάλλοντα με γρήγορα μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά καναλιών, όπως δίπλα σε δρόμο. Η διαμόρφωση πρέπει να είναι ανθεκτική σε πιθανή εξασθένιση.

Από την άποψη της εφαρμογής, τα αντικείμενα θα παρέχουν δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη μιας μεγάλης ποικιλίας υπηρεσιών, είτε άμεσα είτε μέσω σύνθετων διαδικασιών συγχώνευσης δεδομένων και μηχανικής μάθησης.

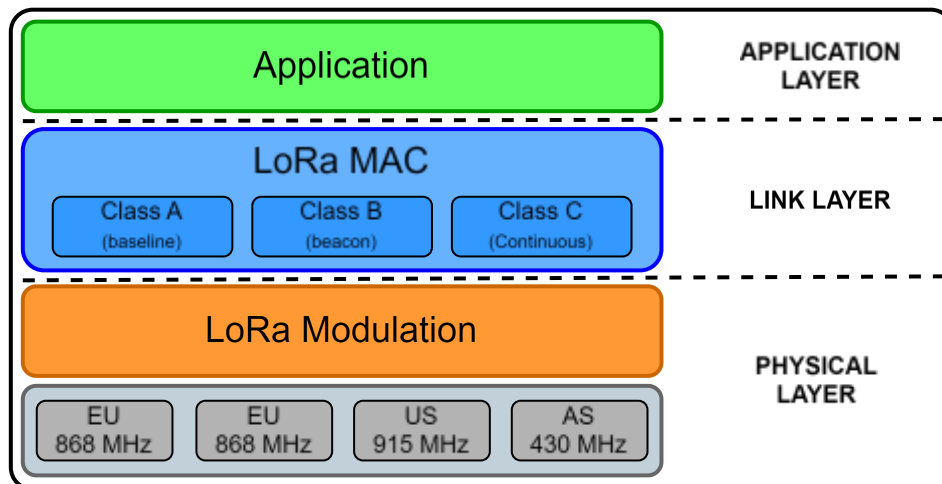
1.3. Στόχος εργασίας

Στόχος της παρούσας εργασίας καθίσταται η γεφύρωση του κενού μεταξύ του καθορισμού των αρχικών παραμέτρων και της εξαγωγής αποτελεσμάτων σε προσομοιώσεις δικτύων LoRaWAN, επιπέδου ζεύξης, βασισμένο στο πιο διαδεδομένο πρωτόκολλο πρόσβασης στο μέσο, το Pure Aloha. Συγκεκριμένα, αναλύεται η μεθοδολογία των προσομοιώσεων αυτού του τύπου, βάσει της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, ενώ παράλληλα επαληθεύεται η εγκυρότητά της μέσω αποτελεσμάτων που συμφωνούν με αναγνωρισμένα επιστημονικά άρθρα.

Κεφάλαιο 2: LoRaWAN

2.1. Διαστρωμάτωση

Η διαστρωμάτωση της τεχνολογίας LoRaWAN, όπως ορίζεται στο [7] από την LoRa Alliance και αποτελείται από τα επίπεδα που φαίνονται στην **Εικόνα 1**.



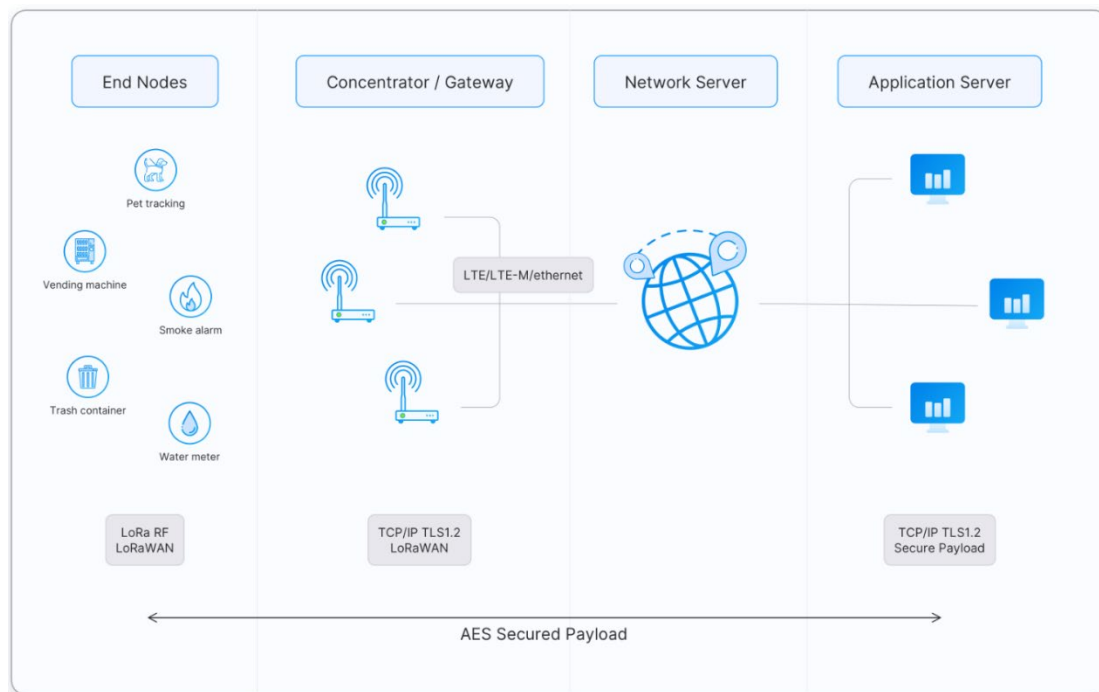
Εικόνα 1: Διαστρωμάτωση στο LoRaWAN

- ❖ Στο φυσικό επίπεδο δικτύου, τα σήματα διαμορφώνονται στις ελεύθερες ζώνες ISM κάτω του 1 GHz, δηλαδή 868 ή 433 MHz στην Ευρώπη, 915 MHz στη Βόρεια Αμερική και 430 MHz στην Ασία[7], [8].
- ❖ Στο επίπεδο ζεύξης καθορίζεται η επικοινωνία σε επίπεδο MAC διευθύνσεων μεταξύ των συσκευών, όπως και ο τρόπος λειτουργίας τους αναφορικά με τις διαφορετικές κλάσεις.
- ❖ Στο επίπεδο εφαρμογής τίθενται όλοι οι κανόνες που εξυπηρετούν την σωστή λειτουργία του εκάστοτε IoT συστήματος.

Να σημειωθεί ότι το φυσικό επίπεδο είναι κλειστό και ιδιόκτητο από την εταιρία Semtech, ενώ τα ανώτερα επίπεδα διαστρωμάτωσης αναπτύσσονται από την εταιρία LoRa Alliance μέσα από ανοιχτά πρότυπα.

2.2. Τοπολογία δικτύου LoRaWAN

Η αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου LoRaWAN βασίζεται συνήθως στην τοπολογία "αστέρα από αστέρες" (star-of-stars).



Εικόνα 2: Τοπολογία δικτύου LoRaWAN[9]

Αυτή η τοπολογία χρησιμοποιεί 4 είδη συσκευών[9]:

- ❖ **Τερματικές συσκευές(End-Nodes):** Αισθητήρες που διαθέτουν πομποδέκτη και επικοινωνούν μόνο με τις πύλες με ασύρματα μηνύματα, διαμορφωμένα κατά LoRa. Παρουσιάζουν χαμηλή κατανάλωση και τροφοδοτούνται από μπαταρία.
- ❖ **Πύλες(Gateways):** Μεσολαβούν μεταξύ τελικών συσκευών και διακομιστή δικτύου μεταβιβάζοντας τα μηνύματα από την μία πλευρά στην άλλη και αντίστροφα. Μπορούν να διατηρήσουν επικοινωνία με εκατοντάδες συσκευές ταυτόχρονα, ενώ επίσης διαφορετικές πύλες μπορούν να λαμβάνουν δεδομένα από την ίδια τερματική συσκευή. Η αλληλεπίδραση με τους κόμβους υλοποιείται σε πρωτόκολλο LoRaWAN, συνήθως ασύρματα, ενώ με τους διακομιστές δικτύου σε πρωτόκολλα Wi-Fi, Ethernet ή σε κυψελοειδή 3G, 4G, 5G. Είναι προφανές λοιπόν ότι η επικοινωνία σε αυτήν την ζεύξη υποστηρίζει αρκετά υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε σύγκριση με το LoRaWAN. Παράλληλα οι πύλες έχουν τον ρόλο γέφυρας, δηλαδή ενισχύουν το σήμα και

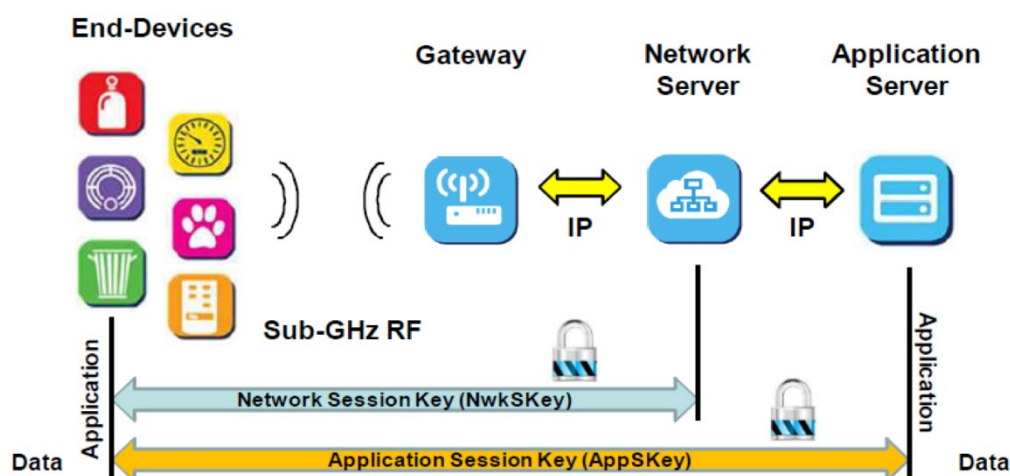
εκτελούν αλγορίθμους αποσφαλμάτωσης στα δεδομένα. Ως προς την τροφοδοσία τους δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός, βρίσκονται σε συνεχή παροχή ισχύος.

- ❖ **Διακομιστές δικτύου(Network Server):** Διακομιστές που εκτελούν λογισμικό για την διαχείριση ολόκληρου του δικτύου.
- ❖ **Διακομιστές εφαρμογών:** Επεξεργάζονται τα μηνύματα δεδομένων για συγκεκριμένες εφαρμογές που λαμβάνονται από τις τελικές συσκευές. Παράγει επίσης όλα τα ωφέλιμα φορτία κατερχόμενη ζεύξης επιπέδου εφαρμογής και τα αποστέλλει στις συνδεδεμένες τερματικές συσκευές μέσω του διακομιστή δικτύου και των πυλών. Ένα δίκτυο LoRaWAN μπορεί να έχει περισσότερους από έναν διακομιστές εφαρμογών. Τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να ερμηνευτούν με την εφαρμογή τεχνικών όπως η μηχανική μάθηση και η τεχνητή νοημοσύνη για την επίλυση επιχειρηματικών προβλημάτων.

2.3. Λειτουργία δικτύου LoRaWAN

Δεδομένου ότι τουλάχιστον μία πύλη βρίσκεται εντός της εμβέλειας των τερματικών συσκευών, όταν ένας κόμβος πρόκειται να μεταδώσει μήνυμα, ορίζει ως διεύθυνση προορισμού στο επίπεδο ζεύξης τη διεύθυνση broadcast. Οι πύλες που λαμβάνουν το μήνυμα LoRa πρέπει να το τροποποιήσουν σε ένα καινούριο, συμβατό με τα πρωτόκολλα επιπέδου ζεύξης που χρησιμοποιούνται στην συνέχεια, αλλά και να το ενθυλακώσουν σε επίπεδο δικτύου και επίπεδο μεταφοράς για την κατάλληλη μεταβίβασή του προς τον διακομιστή δικτύου, με TCP/IP, όπως προβλέπεται. Σε περίπτωση που περισσότερες από μία πύλες αντιληφθούν το μήνυμα του κόμβου, μεταφέρουν όλες το μήνυμα στον διακομιστή δικτύου και καθίσταται αυτός υπεύθυνος για την απόρριψη των διπλότυπων πακέτων. Στην συνέχεια ο διακομιστής δικτύου αποστέλλει το πακέτο στον σωστό διακομιστή εφαρμογών, ανάλογα με το περιεχόμενό του. Με την σειρά του ο επιλεγμένος διακομιστής εφαρμογών αποκωδικοποιεί το περιεχόμενο του πακέτου και αξιοποιεί τις πληροφορίες στην εφαρμογή που διαχειρίζεται. Προαιρετικά, μπορεί να απαντήσει πίσω στον τερματικό κόμβο με ένα μήνυμα επιβεβαίωσης, μέσω του διακομιστή δικτύου και μίας πύλης, έτσι ώστε να τον ενημερώσει πως παρέλαβε το τελευταίο πακέτο.

2.4. Ασφάλεια στο LoRaWAN



Εικόνα 3: Ασφάλεια στο LoRaWAN[10]

Η ασφάλεια του LoRaWAN έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στα γενικά κριτήρια σχεδιασμού του, όπως η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, η μικρή πολυπλοκότητα υλοποίησης, το μειωμένο κόστος και η υψηλή επεκτασιμότητα. Πρόκειται γενικά για ένα από τα λίγα δίκτυα IoT που εφαρμόζουν κρυπτογράφηση από άκρο σε άκρο και φροντίζει μέσα από ορισμένους μηχανισμούς να προστατεύονται οι θεμελιώδεις αρχές της αυθεντικότητας, της ακεραιότητας και της εμπιστευτικότητας. Κάθε συσκευή, πριν μπορέσει να επικοινωνήσει στο δίκτυο, πρέπει πρώτα να προσκομίσει τα απαραίτητα διαπιστευτήρια ασφαλείας και εν τέλει να ενεργοποιηθεί. Αφού ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία, κάθε συσκευή πρέπει να διαθέτει τα κλειδιά **AppSKey**, **NwkSKey** και την διεύθυνση **DevAddr** που την ταυτοποιούν στο δίκτυο. Το **AppSKey** αποτελεί ένα κλειδί 128bit, διαφορετικό για κάθε σύνοδο και κάθε συσκευή, που χρησιμοποιείται στην κρυπτογράφηση της χρήσιμης πληροφορίας(payload), μέσω του συμμετρικού αλγορίθμου AES, στην επικοινωνία μεταξύ συσκευής και διακομιστή εφαρμογών. Το **NwkSKey**, ως κλειδί 128bit, χρησιμοποιείται από κάθε συσκευή και τον διακομιστή δικτύου ώστε να υπολογίζεται και να ταυτοποιείται το MIC(Message Integrity Code), που διασφαλίζει την ακεραιότητα των δεδομένων στην μεταξύ τους επικοινωνία.

Υπάρχουν δύο τρόποι ενεργοποίησης μίας συσκευής σε ένα δίκτυο LoRaWAN. Ο πρώτος είναι ο **OTAA(Over the Air Activation)**[7][11] και αποτελεί την ασφαλέστερη μέθοδο. Σύμφωνα με αυτή, αν μία συσκευή επιθυμεί να εισέλθει στο δίκτυο χρειάζεται να εκτελέσει αίτηση προς τον διακομιστή εφαρμογών, μέσω του

διακομιστή δικτύου, με έναν συγκεκριμένο τύπο μηνύματος, το **Join-Request**. Εφόσον η συσκευή στην παρούσα φάση δεν διαθέτει ακόμα κάποια διεύθυνση ή κλειδί που να την ταυτοποιεί, χρησιμοποιεί διαφορετικά στοιχεία για την αποστολή της αίτησης. Το Join-Request περιέχει λοιπόν το **DevEUI**, ένα μοναδικό αναγνωριστικό της συσκευής, το **AppEUI**, ένα μοναδικό αναγνωριστικό του διακομιστή εφαρμογών, το **JoinEUI**, ένα αναγνωριστικό της αίτησης για σύνδεση και το **DevNonce**, έναν μετρητή μηνυμάτων για αποφυγή επιθέσεων τύπου Replay Attack. Το μήνυμα Join-Request δεν είναι κρυπτογραφημένο κατά την αποστολή του. Για την διασφάλιση της ακεραιότητας του μηνύματος η συσκευή συμπεριλαμβάνει στο μήνυμα και ένα **MIC(Message Integrity Code)** το οποίο υπολογίζεται μέσω του κλειδιού **AppKey** των 128bit που γνωρίζει μόνο η συσκευή και ο διακομιστής εφαρμογών. Μόλις το μήνυμα διαβιβαστεί στον διακομιστή εφαρμογών, εκείνος επαληθεύει το MIC με το AppKey και αν ταυτίζεται με το αναμενόμενο, το μήνυμα κρίνεται αυθεντικό. Έτσι ο διακομιστής εφαρμογών προβαίνει στην αποστολή του **Join-Accept** μηνύματος για να δώσει άδεια στην συσκευή να εισέλθει στο δίκτυο. Το Join-Accept περιέχει τα κλειδιά συνόδου NwkSKey και AppSKey με τα οποία θα προστατεύεται από εδώ και στο εξής η επικοινωνία της συσκευής με τον διακομιστή δικτύου και με τον διακομιστή εφαρμογών αντίστοιχα. Τέλος το Join-Accept, σε αντίθεση με το Join-Request πριν φτάσει στην συσκευή, κρυπτογραφείται με το AppKey ώστε μόνο η συγκεκριμένη συσκευή να γνωρίζει πως να αποκρυπτογραφήσει το μήνυμα και να αποκτήσει τα κλειδιά συνόδου.

Ο δεύτερος τρόπος ενεργοποίησης της συσκευής ονομάζεται **ABP(Activation By Personalization)**[7][11] και θεωρείται πιο απλός και λιγότερο ασφαλής, διότι τα κλειδιά συνόδου AppSKey, NwkSKey και η διεύθυνση της συσκευής DevAddr δεν προκύπτουν δυναμικά μέσω επικοινωνίας, αλλά προγραμματίζονται ώστε να είναι γνωστά από την αρχή στην συσκευή, στον διακομιστή δικτύου και στον διακομιστή εφαρμογών. Έτσι η συσκευή και μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας κρυπτογραφημένα.

Να διευκρινιστεί ότι η κρυπτογράφηση της χρήσιμης πληροφορίας(payload) υφίσταται από άκρο σε άκρο, μεταξύ της συσκευής και του διακομιστή εφαρμογών, ενώ η διασφάλιση ακεραιότητας καλύπτει κάθε μετάδοση ξεχωριστά. Όπως προαναφέρθηκε, μεταξύ της συσκευής και του διακομιστή εφαρμογών μεσολαβούν δύο μεταδόσεις, μία από την συσκευή στον διακομιστή δικτύου και μία ακόμα από τον διακομιστή δικτύου στον διακομιστή εφαρμογών. Επομένως ο διακομιστής δικτύου

βρίσκεται σε σημείο που θα μπορούσε θεωρητικά να αλλοιώσει το περιεχόμενο του κρυπτογραφημένου μηνύματος και να πλήξει την ακεραιότητα του, ωστόσο θεωρείται έμπιστος με πρόθεση μόνο να μεταβιβάσει την πληροφορία στον προορισμό της. Για περισσότερη ασφάλεια, πολλές φορές χρησιμοποιούνται επιπρόσθετοι μηχανισμοί διασφάλισης της ακεραιότητας από τους διαχειριστές του δικτύου ώστε να εξαλειφθεί αυτή η ανησυχία αναφορικά με τον διακομιστή δικτύου. [7]

2.5. Σύγκριση LoRaWAN με άλλα LPWANs

Στην **Εικόνα 4** που αντλείται από το [5], παρατίθενται αναλυτικά τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των πιο γνωστών LPWANs, που αφορούν την διαμόρφωση, το εύρος ζώνης, την εμβέλεια, τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και άλλες παραμέτρους.

	NB-IoT	EC-GSM-IoT	LTE Cat M1	LoRa	SigFox	IQRF	RPMA	Telensa	DASH7
Modulation	QPSK, OFDMA (UL), SC-FDMA (DL)	GMSK, 8PSK	QPSK	CSS	DBPSK, GFSK	GFSK	DSSS, CDMA	FSK	GFSK
Band	Licensed, Sub-GHz	Licensed, Sub-GHz	Licensed, Sub-GHz	Unlicensed, Sub-GHz	Unlicensed, Sub-GHz	Unlicensed, Sub-GHz	Unlicensed, 2.4 GHz	Unlicensed, Sub-GHz	Unlicensed, Sub-GHz
Max Range (Km)	15	15	15	15	10	0 - 5	15	1 - 10	0 - 5
Peak data rate (kbps)	250 kbps (UL), 170 kbps (DL)	10	375	27	1	20	80	65	9.6, 55.666, 166.76
Security	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Indoor	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	No	No
Link budget (dB)	164	164	164	164	N/A	N/A	177	N/A	N/A
Mobility	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Limited	No	N/A
Battery lifetime (Years)	10	10	10	10	5	N/A	15	10	N/A

Εικόνα 4: Χαρακτηριστικά των πιο γνωστών LPWANs [5]

Συγκρίνοντας το δίκτυο LoRa με τα υπόλοιπα παραπάνω, παρατηρείται ότι πράγματι, στο πεδίο της εμβέλειας και της διάρκειας ζωής της μπαταρίας των συσκευών βρίσκεται στην κορυφή μαζί με μερικά ακόμη δίκτυα όπως το NB-IoT, το RPMA και το LTE Cat M1, τα οποία όμως υπερτερούν στον μέγιστο ρυθμό δεδομένων. Ωστόσο, τα δίκτυα LoRa και RPMA πλεονεκτούν στο γεγονός ότι προσφέρουν αυτές τις επιδόσεις με αξιοπρεπή μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε ελεύθερο φάσμα. Μεταξύ των δύο αυτών, το LoRa εμφανίζει δυνατότητα κινητικότητας των συσκευών στο δίκτυο ενώ το RPMA η δυνατότητα αυτή είναι περιορισμένη.

	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Modulation	BPSK	CSS	QPSK
Frequency	Unlicensed ISM bands (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America, and 433 MHz in Asia)	Unlicensed ISM bands (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America, and 433 MHz in Asia)	Licensed LTE frequency bands
Bandwidth	100 Hz	250 kHz and 125 kHz	200 kHz
Maximum data rate	100 bps	50 kbps	200 kbps
Bidirectional	Limited / Half-duplex	Yes / Half-duplex	Yes / Half-duplex
Maximum messages/day	140 (UL), 4 (DL)	Unlimited	Unlimited
Maximum payload length	12 bytes (UL), 8 bytes (DL)	243 bytes	1600 bytes
Range	10 km (urban), 40 km (rural)	5 km (urban), 20 km (rural)	1 km (urban), 10 km (rural)
Interference immunity	Very high	Very high	Low
Authentication & encryption	Not supported	Yes (AES 128b)	Yes (LTE encryption)
Adaptive data rate	No	Yes	No
Handover	End-devices do not join a single base station	End-devices do not join a single base station	End-devices join a single base station
Localization	Yes (RSSI)	Yes (TDOA)	No (under specification)
Allow private network	No	Yes	No
Standardization	Sigfox company is collaborating with ETSI on the standardization of Sigfox-based network	LoRa-Alliance	3GPP

Εικόνα 5: Χαρακτηριστικά Δικτύων Sigfox, LoRaWAN, NB-IoT[8]

Σε αντίθεση με άλλα δίκτυα που έχουν υψηλές επιδόσεις στα κύρια χαρακτηριστικά τους, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 5** από το [8], το LoRa υποστηρίζει δυναμικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, εφαρμογές με κινούμενους κόμβους αλλά και κρυπτογραφία.

Για τους παραπάνω λόγους και κυρίως για την ιδιότητα της χρήσης ελεύθερου φάσματος, το LoRa έχει αποτελέσει ένα πολύ διαδεδομένο δίκτυο για IoT εφαρμογές. Έτσι έχει σχηματιστεί το The Things Network, ένα παγκόσμιο συνεργατικό και ανοιχτό οικοσύστημα του Διαδικτύου των Πραγμάτων που δημιουργεί δίκτυα, συσκευές και λύσεις χρησιμοποιώντας το LoRaWAN



Εικόνα 6: The Things Network[12]

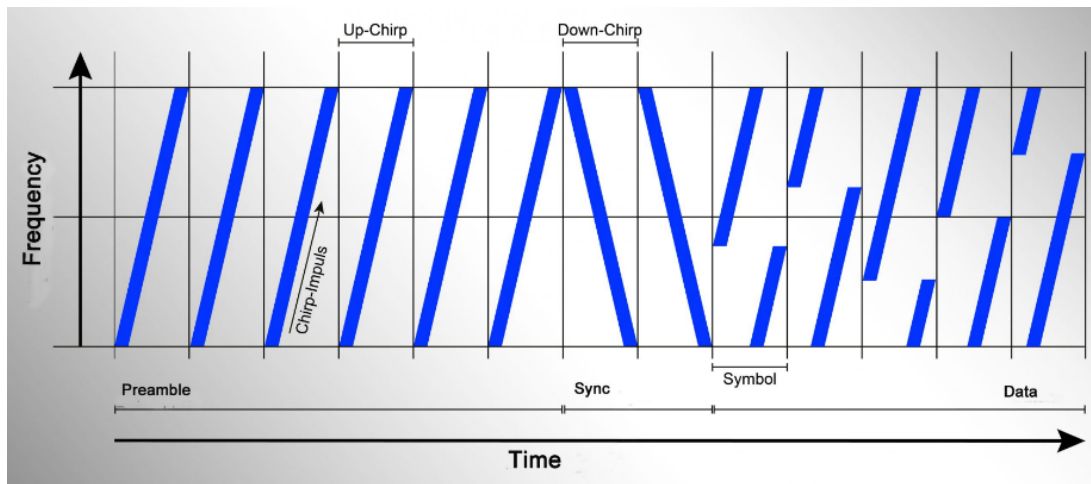
2.6. Φυσικό Επίπεδο

2.6.1. Διαμόρφωση και CSS

Όπως αναφέρθηκε, στο φυσικό επίπεδο δικτύου τα σήματα διαμορφώνονται σε ελεύθερες ζώνες ISM κάτω του 1 GHz. Για την διαμόρφωση χρησιμοποιείται μια ιδιαίτερη τεχνική διασποράς φάσματος, το Chirp Spread Spectrum(CSS), η οποία ξεκίνησε να χρησιμοποιείται από το 1940 για στρατιωτικούς σκοπούς. Το CSS, διαχέει ένα σήμα στενής ζώνης σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης καναλιού του οποίου η συχνότητα αυξάνεται ή μειώνεται με το χρόνο διατηρώντας όμως το πλάτος σταθερό. Έτσι το σήμα περνά σε όλο το εύρος ζώνης, από το ένα άκρο στο άλλο, σε ένα καθορισμένο χρόνο. Ως αποτέλεσμα, έχει χαμηλά επίπεδα θορύβου, επιτρέποντας υψηλή ανθεκτικότητα στις παρεμβολές και είναι δύσκολο να ανιχνευθεί ή να παρεμποδιστεί.

Σχετικά με τις παραμέτρους που καθορίζουν την κωδικοποίηση CSS και κατά επέκταση το διαμορφωμένο σήμα κατά LoRa, ένας πολύ βασικός παράγοντας είναι αυτός της διάχυσης του σήματος γνωστός ως Spreading Factor(SF). Οι τιμές του κυμαίνονται από 6 έως 12 και δηλώνει τον αριθμό των bits που κωδικοποιούνται σε κάθε σύμβολο κατά τη διάρκεια της μετάδοσης. Επομένως, ένας μεγαλύτερος SF σημαίνει ότι περισσότερα bits αναλογούν σε κάθε σύμβολο, άρα και περισσότερος χρόνος για την μετάδοσή του. Με αυτόν τον τρόπο, ο SF καθορίζει πόσο γρήγορα το σήμα "σαρώνει" το εύρος συχνοτήτων. Όταν ο SF είναι υψηλός, η συχνότητα του σήματος μεταβάλλεται πιο αργά, πράγμα που σημαίνει ότι το σήμα παραμένει περισσότερο χρόνο σε κάθε συγκεκριμένη συχνότητα κατά τη διάρκεια της μετάδοσης. Αυτό καθιστά το σήμα πιο εύκολα καταληπτό από τον δέκτη ακόμη και σε μακρινές αποστάσεις ή σε περιβάλλοντα με υψηλό θόρυβο.

Το CSS ορίζει μια ψηφιακή διαμόρφωση, με M πιθανές κυματομορφές στην έξοδο του διαμορφωτή, τα σήματα chirps, στο διάστημα συχνοτήτων $[f_0 - \frac{BW}{2}, f_0 + \frac{BW}{2}]$, με M διαφορετικές αρχικές συχνότητες f_0 . Τα δεδομένα αναπαρίστανται από ένα σήμα του οποίου η στιγμιαία συχνότητα αυξάνεται ή μειώνεται γραμμικά με κυκλικές συχνοτικές εναλλαγές. Έτσι κάθε ανοδική(Up-Chirp) ή καθοδική(Down-Chirp) πορεία του σήματος ορίζει ένα κωδικοποιημένο σύμβολο στο διάστημα που αναλογεί σε έναν πλήρη κύκλο στο πεδίο της συχνότητας [13]



Εικόνα 7: Σήματα Chirp[14]

Δεδομένου ότι το πλήθος των bits κάθε συμβόλου ισούται με την τιμή του SF, οι πιθανές κυματομορφές στην έξοδο του διαμορφωτή υπολογίζονται σε αριθμό ίσες με $M = 2^{SF}$. Ταυτόχρονα, χωρίζουμε κάθε chirp σε πολύ μικρές επιμέρους κυματομορφές, οι οποίες είναι 2^{SF} σε αριθμό και ονομάζονται “chips”.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 7**, το πρώτο μέρος κάθε σήματος LoRa ονομάζεται προοίμιο(preamble). Αποτελείται από 8 σύμβολα, μαζί με το διάστημα του συγχρονισμού Sync, για όλες τις περιοχές, όπως αναφέρεται στις προδιαγραφές των βασικών παραμέτρων του LoRaWAN[15] και ξεκινάει αρχικά με 6 Up-Chirps ενώ στην συνέχεια ακολουθούν 2 Down-Chirps. Ωστόσο, ο ραδιοπομπός θα προσθέσει άλλα 4,25 σύμβολα με αποτέλεσμα το τελικό μήκος του προοιμίου να είναι $8 + 4,25 = 12,25$ σύμβολα.

Η κύρια χρησιμότητά του έγκειται στο γεγονός ότι το LoRa λειτουργεί σε μεγάλες αποστάσεις και σε περιβάλλοντα με πιθανές παρεμβολές, όπου ο συγχρονισμός καθίσταται παράγοντας ζωτικής σημασίας για να μπορέσει ο δέκτης να ερμηνεύσει σωστά τα δεδομένα που ακολουθούν. Το προοίμιο υποδεικνύει ουσιαστικά την έναρξη ενός μηνύματος, επιτρέποντας στο δέκτη να προετοιμαστεί για τη λήψη δεδομένων. Χωρίς αυτό το σήμα, ο δέκτης μπορεί να χάσει την αρχή του πακέτου δεδομένων, οδηγώντας σε σφάλματα στην ερμηνεία τους. Συμπληρωματικά σε πολλά δίκτυα LoRa, οι συσκευές βρίσκονται συχνά σε κατάσταση χαμηλής ισχύος ή σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας, για εξοικονόμηση ενέργειας. Το προοίμιο χρησιμεύει και ως σήμα αφύπνισης, προειδοποιώντας τον δέκτη ότι πρόκειται να φτάσει ένα πακέτο δεδομένων. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία, όπου η ενεργειακή απόδοση αποτελεί προτεραιότητα.

Πρακτικά, η ακολουθία των επαναλαμβανόμενων Up-Chirps του προοιμίου βοηθά το δέκτη να αντιληφθεί τη συχνότητα και το χρόνο του εισερχόμενου σήματος και να συντονίσει τον τοπικό ταλαντωτή του ώστε να ταιριάζει με το εύρος συχνοτήτων του πομπού και τελικά να συγχρονιστεί. Αυτή η διαδικασία είναι ζωτικής σημασίας για τη σωστή αποδιαμόρφωση των συμβόλων που αντιπροσωπεύουν τα δεδομένα. Η μετάβαση από Up-Chirps σε Down-Chirps σηματοδοτεί στο δέκτη ότι το πραγματικό ωφέλιμο φορτίο δεδομένων πρόκειται να ξεκινήσει. Αυτή η μετάβαση είναι μια σαφής ένδειξη ότι η φάση συγχρονισμού έχει ολοκληρωθεί και ο δέκτης πρέπει τώρα να προετοιμαστεί για την αποκωδικοποίηση των συμβόλων δεδομένων που ακολουθούν.

2.6.2. Υπολογισμός βασικών παραμέτρων

Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 2.6.1, εφόσον χωρίζουμε κάθε σύμβολο σε 2^{SF} chips, προκύπτει η εξής σχέση:

$$1 \text{ symbol} = 2^{SF} \text{ chips} \quad (1)$$

Επίσης, αφού κάθε σύμβολο αναπαρίσταται σε bits, πλήθους SF, προφανώς ισχύει:

$$1 \text{ symbol} = SF \text{ bits} \quad (2)$$

Μία βασική και σταθερή παράμετρος στην επικοινωνία LoRa είναι το εύρος ζώνης (BW). Στην ουσία το εύρος ζώνης αντιπροσωπεύει τον ρυθμό μετάδοσης των chips. Δηλαδή:

$$R_{chip} = BW (\text{Hz ή chips/sec}) \quad (3)$$

Έτσι αντίστοιχα μπορούμε να υπολογίσουμε την περίοδο ενός chip από την σχέση:

$$T_{chip} = \frac{1}{R_{chip}} = \frac{1}{BW} \text{ (sec)} \quad (4)$$

Στην περίπτωση του συμβόλου LoRa, για να βρούμε τον ρυθμό μετάδοσης εκμεταλλευόμαστε τις σχέσεις (1) και (3):

$$R_{chip} = BW(chips/sec) \stackrel{(1)}{\Rightarrow} R_{sym} = \frac{BW}{2^{SF}} (symbols/sec) \quad (5)$$

Και προφανώς η περίοδος συμβόλου είναι η εξής:

$$T_{sym} = \frac{1}{R_{sym}} = \frac{2^{SF}}{BW} (sec) \quad (6)$$

Κατά την επικοινωνία μεταξύ δύο συσκευών συχνά τα μηνύματα αλλοιώνονται εξαιτίας της επίδρασης θορύβου στο κανάλι. Έτσι, προκειμένου να διασφαλισθεί η ακεραιότητα και η αξιοπιστία των μηνυμάτων στα δίκτυα LoRaWAN εγκαταστάθηκε ο μηχανισμός **FEC(Forward Error Correction)**[16]. Σύμφωνα με αυτόν, κατά την αποστολή οποιουδήποτε πακέτου LoRa δεν περιέχεται μόνο η χρήσιμη πληροφορία, αλλά και κάποια επιπλέον bits που χρησιμεύουν στην αποσφαλμάτωση. Συγκεκριμένα, έχει οριστεί μία μεταβλητή, η **CR(Coding Rate)**, που πλαισιώνεται σε ένα πεδίο του πακέτου και αντιπροσωπεύει την αναλογία των bits που θα προστεθούν για αποσφαλμάτωση σε σχέση με το συνολικό πλήθος των bits πληροφορίας. Το πεδίο CR μπορεί να πάρει τιμές από 1 έως και 4, οι οποίες κωδικοποιούνται στην στις αντίστοιχες αναλογίες του **Πίνακα I**.

Πίνακας I: Αναλογία Κωδικοποίησης LoRa

Τιμή CR	1	2	3	4
Αναλογία κωδικοποίησης	4/5	4/6	4/7	4/8
$\frac{Bits \text{ αποσφαλμάτωσης}}{\text{Συνολικά bits}}$	1/5	2/6	3/7	4/8

Για την εύρεση του ρυθμού μετάδοσης σε επίπεδο bit επομένως, χρειάζεται να ληφθούν υπόψιν και τα bits αποσφαλμάτωσης βάσει της αναλογίας κωδικοποίησης.

Έτσι, χρησιμοποιώντας την σχέση (2):

$$R_{bit} = R_{symbol} \cdot SF \cdot CR = \frac{BW \cdot SF \cdot CR}{2^{SF}} \quad (7)$$

Μία ίσως από τις πιο σημαντικές παραμέτρους στην επικοινωνία LoRa ονομάζεται ToA(Time on Air). Είναι ο χρόνος δηλαδή που ένα πακέτο μεταδίδεται στο μέσο, εννοείται στον αέρα, αφού η επικοινωνία μεταξύ LoRa συσκευών είναι ασύρματη κατά βάση. Η μεταβλητή αυτή είναι σημαντική ως το αποτέλεσμα της επιλογής των παραμέτρων που διαμορφώνουν το σήμα LoRa. Γίνεται καταληπτό δηλαδή πώς επηρεάζει χρονικά η κάθε παράμετρος το τελικό μας μήνυμα και με ποια βαρύτητα. Αν συνυπολογιστεί μάλιστα το γεγονός ότι το φυσικό επίπεδο του πρωτοκόλλου LoRaWAN είναι κλειστό και ιδιόκτητο από την εταιρία Semtech, το ToA είναι από τα πιο θεμελιώδη στοιχεία στην σκιαγράφηση της συμπεριφοράς του φυσικού σήματος. Όπως υποδεικνύει η Semtech στο [17] του πακέτου χρειάζεται να βρεθεί πρώτα ο χρόνος που αναλογεί στο προοίμιο του μηνύματος:

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4.25) \cdot T_{sym} \quad (8)$$

Όπου $n_{preamble}$ ορίζεται ως το πλήθος συμβόλων του προοιμίου και T_{sym} ως η περίοδος συμβόλου από την σχέση (6).

Έπειτα, απαιτείται ο υπολογισμός των συμβόλων, $n_{payload}$, του περιεχομένου του μηνύματος[17]:

$$n_{payload} = 8 + \max \left(\left\lceil \frac{(8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH)}{4(SF - 2DE)} \right\rceil (CR + 4), 0 \right) \quad (9)$$

και χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μεταβλητές:

- ❖ **PL(Float):** Μέγεθος του περιεχομένου σε bytes
- ❖ **SF(Integer):** O Spreading Factor
- ❖ **IH (Boolean):** Για $IH = 1$, επιλέγεται η λειτουργία Implicit Header, όπου δεν προστίθεται κεφαλίδα στο μήνυμα, ενώ για $IH = 0$ επιλέγεται η λειτουργία Explicit Header, όπου προστίθεται κεφαλίδα. Να σημειωθεί ότι για $SF = 6$ επιβάλλεται η λειτουργία Implicit Header.[7]
- ❖ **DE (Boolean):** Η λειτουργία “LowDataRateOptimize” ενεργοποιείται με $DE=1$. Χρησιμοποιείται όταν εφαρμόζεται μεγάλη τιμή του SF, όπου αυξάνεται η διάρκεια του πακέτου και επιφέρεται χαμηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων. Ως αποτέλεσμα αυξάνεται η ανθεκτικότητα της μετάδοσης σε μεταβολές της

συχνότητας, τόσο στην λήψη όσο και στην αποστολή πακέτων. Η χρήση του επιβάλλεται όταν η διάρκεια του συμβόλου υπερβαίνει τα 16ms. Να σημειωθεί ότι ο πομπός και ο δέκτης πρέπει να παίρνουν κοινή απόφαση για την εφαρμογή της λειτουργίας LowDataRateOptimize.

❖ **CRC(Cyclic Redundancy Check):** Όταν η μεταβλητή CRC τίθεται σε 1 ο έλεγχος CRC περιλαμβάνεται στο ωφέλιμο φορτίο για την επαλήθευση της ακεραιότητας των δεδομένων. Περισσότερη ανάλυση διατίθεται στην ενότητα 2.7.2.

❖ **CR(Coding Rate):** Λαμβάνει τιμές από 1 έως 4 που αντιστοιχούν στις αναλογίες κωδικοποίησης δεδομένων του **Πίνακα I**.

Στην συνέχεια, αφού υπολογίστηκε το πλήθος των συμβόλων του περιεχομένου του μηνύματος, είναι πλέον εύκολο να υπολογιστεί και η διάρκεια που καταλαμβάνουν.

$$T_{payload} = n_{payload} \cdot T_{sym} \quad (10)$$

Τέλος, ο συνολικός χρόνος μετάδοσης του πακέτου προκύπτει από το άθροισμα της διάρκειας του προοιμίου και της διάρκειας του περιεχομένου:

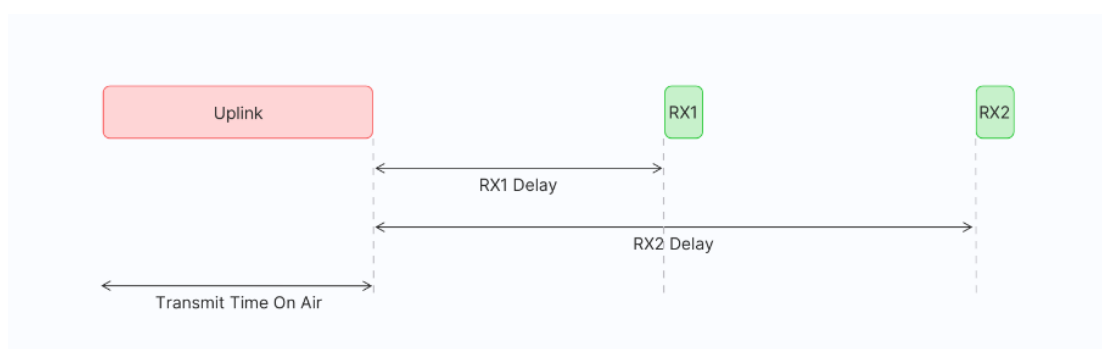
$$ToA = T_{preamble} + T_{payload} \quad (11)$$

2.7. Επίπεδο Ζεύξης

2.7.1. Κλάσεις

Σε ένα δίκτυο LoRaWAN, υπάρχουν τρεις κλάσεις συσκευών ανάλογα με την συχνότητα της επικοινωνίας τους με την πύλη δικτύου. Και οι τρεις κλάσεις διεξάγουν αμφίδρομη επικοινωνία, λειτουργούν δηλαδή ως πομποί(Tx), αλλά και ως δέκτες(Rx), με διαφορετικό τρόπο όμως σε κάθε περίπτωση.

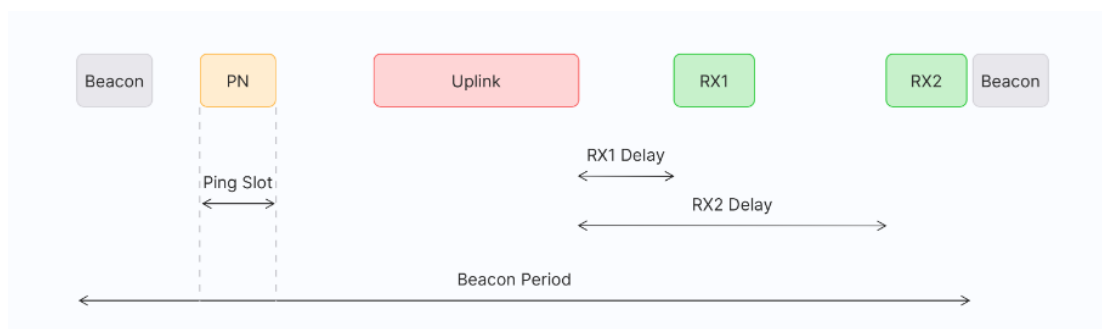
2.7.1.1. Κλάση A



Εικόνα 8: Λειτουργία συσκευής LoRa κλάσης A[18]

Η κλάση A ορίζει την πιο απλή κατηγορία επικοινωνίας κατά την οποία, οι συσκευές βρίσκονται προεπιλεγμένα σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας(sleep mode). Σε περίπτωση που μία συσκευή επιθυμεί να στείλει δεδομένα, τίθεται σε κατάσταση πομπού(Tx) μέχρι να ολοκληρωθεί η μετάδοση των δεδομένων. Έπειτα μόλις επέλθει ένα προκαθορισμένο διάστημα αδράνειας, τίθεται σε κατάσταση δέκτη(Rx) για 2 μεμονωμένες χρονικές θυρίδες, σύμφωνα με την **Εικόνα 8**. Τα διαστήματα «RX Delay 1» και «RX Delay 2», αναφέρονται στο διάστημα που μεσολαβεί από το πέρας της μετάδοσης μέχρι την πρώτη(RX1) και την δεύτερη χρονοθυρίδα λήψης(RX2) αντίστοιχα, όπου η συσκευή τίθεται σε κατάσταση δέκτη. Όπως είναι φανερό η κλάση A δίνει προτεραιότητα στην αποστολή δεδομένων και λαμβάνει πληροφορίες μόνο μετά από αυτήν. Έτσι, οι συσκευές κλάσης A δεν χρειάζεται να ελέγχουν διαρκώς για την λήψη δεδομένων, παραμένοντας περισσότερο χρόνο σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση, πληρώνοντας ωστόσο το τίμημα της λιγότερο αποτελεσματικής επικοινωνίας λόγω καθυστέρησης. [7] [18]

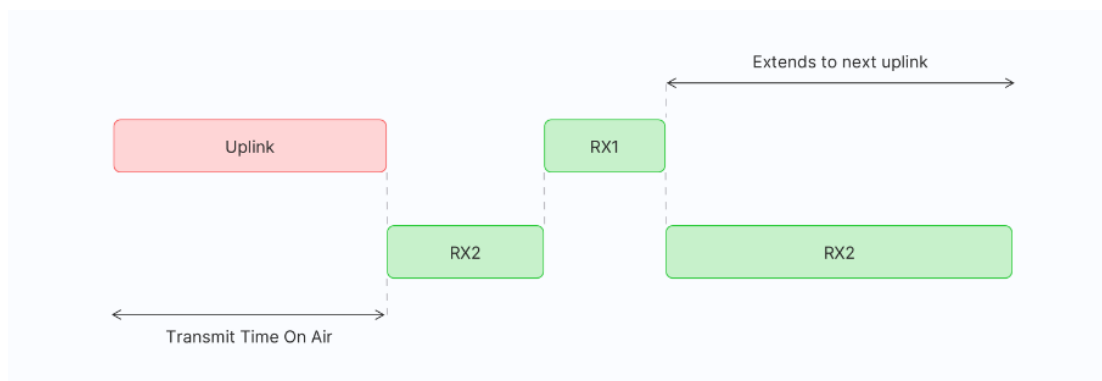
2.7.1.2. Κλάση B



Εικόνα 9: Λειτουργία συσκευής LoRa κλάσης B[18]

Η κλάση B έχει ως βάση την κλάση A, συνεπώς μετά από κάθε μετάδοση οι συσκευές ανοίγουν τις 2 χρονοθυρίδες λήψης δεδομένων RX1 και RX2. Εκτός αυτού όμως επεκτείνονται οι δυνατότητες της κλάσης A ανοίγοντας περιοδικά κάποια επιπλέον παράθυρα λήψης μηνυμάτων που ονομάζονται χρονοθυρίδες ping(PN). Έτσι, σε αντίθεση με την κλάση A, οι συσκευές ελέγχουν για τυχόν λαμβανόμενα μηνύματα ανά τακτικά διαστήματα και όχι μόνο μετά από κάθε μετάδοση. Εκτός αυτού οι πύλες δικτύου(gateways) εκπέμπουν περιοδικά ένα συγχρονισμένο σηματοδότη(Beacon) ο οποίος λαμβάνεται από τις τελικές συσκευές και τους παρέχει μία αναφορά χρονισμού, επιτρέποντάς τους να ευθυγραμμίσουν τα εσωτερικά τους ρολόγια με το δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο ο διακομιστής δικτύου γνωρίζει πότε να στείλει δεδομένα σε μια συγκεκριμένη συσκευή ή σε μια ομάδα συσκευών. Ο χρόνος μεταξύ δύο σηματοδοτών είναι γνωστός ως περίοδος σηματοδότη(beacon period). Ως αποτέλεσμα, οι συσκευές κλάσης B αυξάνουν ελαφρώς την κατανάλωση ισχύος, ωστόσο καθιστούν την επικοινωνία αποδοτικότερη μειώνοντας την καθυστέρηση.[12]

2.7.1.3. Κλάση C

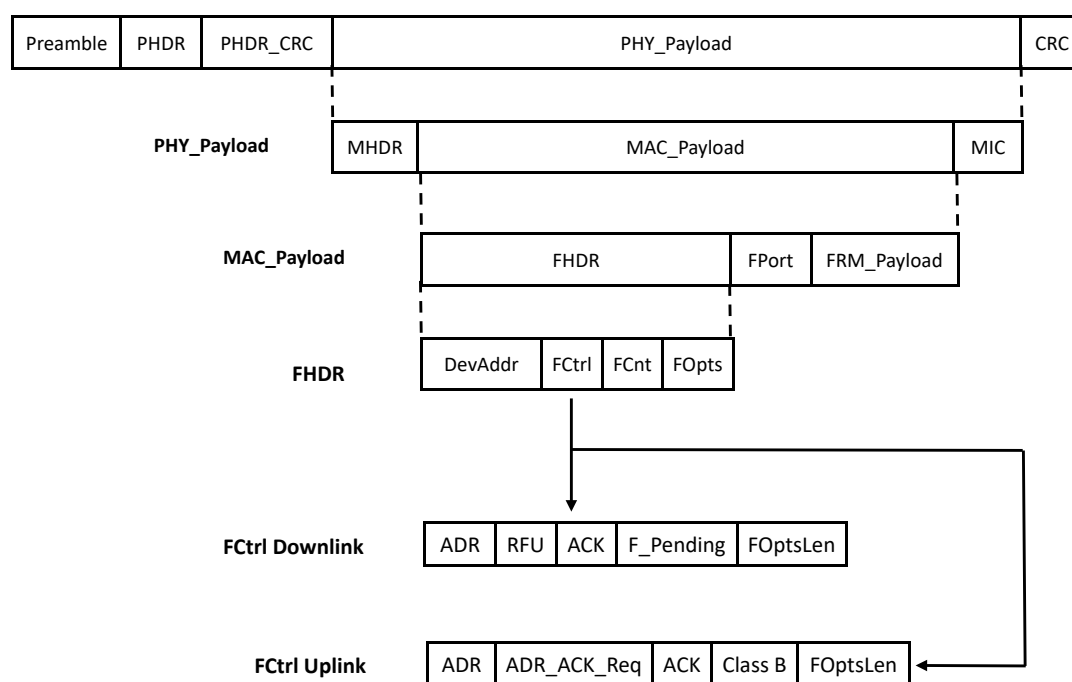


Εικόνα 10: Λειτουργία συσκευής LoRa κλάσης C[18]

Οι συσκευές κλάσης C επεκτείνουν τις δυνατότητες της κλάσης B, διατηρώντας τις χρονοθυρίδες λήψης ανοιχτές, εκτός αν μεταδίδουν, όπως φαίνεται στο σχήμα της **Εικόνας 10**. Επομένως, βρίσκονται προεπιλεγμένα σε κατάσταση δέκτη(Rx) και μπορούν να λαμβάνουν μηνύματα σχεδόν ανά πάσα στιγμή, έχοντας έτσι πολύ χαμηλή καθυστέρηση. Αυτά τα εισερχόμενα μηνύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενεργοποίηση ορισμένων λειτουργιών μιας συσκευής, όπως η μείωση της φωτεινότητας ενός φωτιστικού σώματος ή η ενεργοποίηση της βαλβίδας διακοπής ενός υδρομετρητή. Ως αποτέλεσμα, οι συσκευές κλάσης C παρουσιάζουν την μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος, αλλά πολύ αποτελεσματική επικοινωνία με μικρή καθυστέρηση σε σύγκριση με συσκευές κλάσης A και B.[18]

2.7.2. Δομή Πακέτου LoRa

Η βασική δομή ενός LoRa πακέτου περιγράφεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 11**:



Εικόνα 11: Δομή πακέτου LoRa

❖ LoRa PHYSICAL LAYER

Πίνακας II: Δομή πακέτου LoRa στο Φυσικό Επίπεδο[7]

Preamble	PHDR	PHDR_CRC	PHY_Payload	CRC
----------	------	----------	-------------	-----

- **Preamble:** Αντιπροσωπεύει την κωδικοποιημένη ακολουθία των chirps που ορίζουν την αρχή κάθε μηνύματος και χρησιμοποιείται για το συντονισμό του δέκτη. Πρέπει να αποτελείται από 8 σύμβολα για όλες τις περιοχές. Το μέγεθός του ωστόσο σε bits μεταβάλλεται ανάλογα με τον SF.
- **PHDR(Physical Header):** Προαιρετική επικεφαλίδα, χρήσιμη ώστε να καταλάβει ο δέκτης πώς να αποκωδικοποιήσει σωστά το ωφέλιμο φορτίο. Μπορεί να περιλαμβάνει λεπτομέρειες όπως το μήκος του ωφέλιμου φορτίου και το ρυθμό δεδομένων. Σε περίπτωση που περιέχεται αναφερόμαστε σε λειτουργία “Explicit Header”, ενώ διαφορετικά σε λειτουργία “Implicit Header”.
- **PHDR_CRC(Physical Header Cyclic Redundancy Check):** Προαιρετικό πεδίο που περιέχει έναν κωδικό ανίχνευσης σφαλμάτων για το περιεχόμενο της επικεφαλίδας.
- **CRC(Cyclic Redundancy Check):** Προαιρετικό πεδίο που περιέχει έναν κωδικό ανίχνευσης σφαλμάτων για την επαλήθευση της ακεραιότητας των δεδομένων. Αυτό συμβαίνει κατά τη διάρκεια της μετάδοσης πακέτων και ο δέκτης μπορεί να επικυρώσει την ορθότητα των δεδομένων που έλαβε. Εφαρμόζεται τόσο στην επικεφαλίδα όσο και στο ωφέλιμο φορτίο και συνήθως ενεργοποιείται όταν η ακεραιότητα των δεδομένων είναι κρίσιμη, διασφαλίζοντας ότι τα σφάλματα που εισάγονται κατά τη μετάδοση μπορούν να εντοπιστούν. Ενεργοποιείται μόνο στην αποστολή δεδομένων και όχι στην λήψη.

Να διευκρινιστεί ότι η διαφορά του μηχανισμού CRC με τον FEC είναι η εξής: Τα πλεονάζοντα bits που προστίθενται από το CR, στον FEC, βοηθούν το δέκτη να ανιχνεύσει και να διορθώσει σφάλματα χωρίς να χρειάζεται αναμετάδοση, ενώ ο CRC είναι καθαρά ένας μηχανισμός ανίχνευσης, όχι διόρθωσης. Υπολογίζει ένα άθροισμα ελέγχου για τα μεταδιδόμενα δεδομένα και το συγκρίνει στο δέκτη. Εάν ο έλεγχος CRC αποτύχει, αυτό σημαίνει ότι ανιχνεύθηκαν σφάλματα και η πληροφορία χρειάζεται να αναμεταδοθεί.
- **PHY_Payload(Physical Payload):** Η πληροφορία του μηνύματος ενός LoRa πακέτου στο φυσικό επίπεδο.

❖ PHY PAYLOAD

Πίνακας III: Δομή πεδίου PHY Payload[7]

MHDR	MAC_Payload	MIC
------	-------------	-----

- **MHDR(MAC Header):** Η κεφαλίδα MAC προσδιορίζει τον τύπο πλαισίου(FType) και την κύρια έκδοση πρωτοκόλλου LoRaWAN σύμφωνα με την οποία έχει κωδικοποιηθεί το πλαίσιο. Αποτελείται από 3 μεταβλητές και έχει μέγεθος 8 bits.

Πίνακας IV: Δομή MHDR[7]

Bits	[7:5]	[4:2]	[1:0]
MHDR	FType	RFU	Major

- **FType(Frame Type):** Ορίζει τον τύπο του LoRa μηνύματος σύμφωνα με τον παρακάτω **Πίνακα V**.

Πίνακας V: Πιθανές τιμές του πεδίου FType[7]

FType	Description
000	Join-Request
001	Join-Accept
010	Unconfirmed Data Uplink
011	Unconfirmed Data Downlink
100	Confirmed Data Uplink
101	Confirmed Data Downlink
110	RFU
111	Proprietary

- **Major:** Υποδεικνύει την έκδοση των προδιαγραφών του πρωτοκόλλου LoRaWAN που τηρούνται για την διεκπεραίωση της επικοινωνίας μεταξύ πομπού και δέκτη, ώστε να υπάρχει πλήρης συμβατότητα. Αυτήν την στιγμή η πιο πρόσφατη έκδοση του πρωτοκόλλου είναι η 1.0.4.

- **RFU(Reserved for Future Use):** Δεν χρησιμοποιείται προς το παρόν, εκτιμάται όμως ότι μελλοντικά θα χρειαστεί άλλη μία μεταβλητή, γι' αυτό και δεσμεύεται.
- **MAC_Payload:** Περιέχει τα πραγματικά δεδομένα που μεταδίδονται μεταξύ της τελικής συσκευής και του διακομιστή δικτύου ενώ είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά τόσο των δεδομένων εφαρμογής όσο και των δεδομένων ελέγχου.
- **MIC(Message Integrity Code):** Επιτρέπει στον παραλήπτη ενός μηνύματος να επαληθεύσει ότι το μήνυμα δεν έχει αλλοιωθεί κατά τη μετάδοση. Οποιαδήποτε τροποποίηση του μηνύματος (είτε τυχαία είτε κακόβουλη) θα είχε ως αποτέλεσμα ένα μη αναμενόμενο MIC, υποδεικνύοντας ότι η ακεραιότητα του μηνύματος έχει παραβιαστεί.

❖ MAC PAYLOAD

Πίνακας VI: Δομή του MAC Payload[7]

FHDR	FPort	FRM_Payload
------	-------	-------------

- **FHDR(Frame Header):** Κεφαλίδα που περιέχει πληροφορίες σχετικά με την δρομολόγηση των πακέτων και την διαχείριση των δεδομένων μεταξύ συσκευής και εξυπηρετητή.
- **FPort(Frame Port):** Προαιρετικό πεδίο, χρήσιμο τόσο στην αποστολή, αλλά και στην λήψη μηνυμάτων. Χρησιμοποιείται για να υποδείξει τον τύπο της εφαρμογής ή της υπηρεσίας για την οποία προορίζονται τα δεδομένα του ωφέλιμου φορτίου, βοηθώντας τον δέκτη να επεξεργαστεί σωστά τα δεδομένα.
- **FRM_Payload:** Περιέχει τα δεδομένα του πομπού και καθίσταται προαιρετικό πεδίο. Δηλαδή, μπορεί να υπάρξει μήνυμα με κενό το πεδίο των δεδομένων FRM_Payload.

❖ FHDR

Πίνακας VII: Δομή του πεδίου FHDR[7]

Size(octets)	4	1	2	0...15
FHDR	DevAddr	FCtrl	FCnt	FOpts

- **DevAddr(Device Address):** Περιέχει την διεύθυνση της συσκευής προορισμού, δηλαδή τον παραλήπτη.
- **FCtrl(Frame Control):** Περιέχει σηματοδότες και πληροφορίες ελέγχου που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση διαφόρων πτυχών της επικοινωνίας μεταξύ μιας συσκευής και του διακομιστή δικτύου.
- **FCnt(Frame Counter):** Κρατάει την απαρίθμηση πακέτων. Αποτελείται από 2 οκτάδες, καθώς στην πραγματικότητα κάθε συσκευή διαθέτει 2 απαριθμητές, τον FCntUp(Frame Count Uplink) και τον FCntDown, οι οποίοι αυξάνονται κατά 1 όταν αποστέλλεται και όταν λαμβάνεται μήνυμα αντίστοιχα.
- **FOpts(Frame Options):** Προαιρετικό πεδίο. Παραλείπεται αν η παράμετρος FOptsLen είναι ίση με 0 στο πεδίο FCtrl. Αποτελείται από το πεδίο CID(Command Identifier), το οποίο προσδιορίζει την κάθε MAC εντολή και τις παραμέτρους για την εκάστοτε επιλεγμένη εντολή.

❖ **FCtrl - DOWNLINK**

Όταν πρόκειται για λαμβανόμενο(downlink) πακέτο, τότε αποτελείται από τα εξής πεδία:

Πίνακας VIII: Δομή του πεδίου FCtrl-Downlink[7]

Bits	[7]	[6]	[5]	[4]	[3...0]
FCtrl	ADR	RFU	ACK	F_Pending	FOptsLen

- **ADR(Adaptive Data Rate):** Χρησιμοποιείται για να δηλώσει εάν η συσκευή επιθυμεί να χρησιμοποιήσει το μηχανισμό ADR, ο οποίος βελτιστοποιεί τους ρυθμούς δεδομένων και τα επίπεδα ισχύος με βάση τις συνθήκες του δικτύου.
- **RFU(Reserved for Future Use):** Δεν χρησιμοποιείται προς το παρόν, εκτιμάται όμως ότι μελλοντικά θα χρειαστεί, γι' αυτό και δεσμεύεται.
- **ACK(Acknowledgment):** Εάν οριστεί σε 1, υποδεικνύει ότι το απεσταλμένο πλαίσιο επιβεβαιώνει τη λήψη ενός ληφθέντος πλαισίου.
- **F_Pending(Frame Pending):** Χρησιμοποιείται μόνο στην αποστολή μηνύματος. Για συσκευές κλάσης A, υποδεικνύει ότι ο διακομιστής δικτύου έχει περισσότερα δεδομένα που εκκρεμούν προς αποστολή και επομένως η τελική συσκευή συνιστάται να στείλει ένα μήνυμα ώστε να ανοίξουν χρονοθυρίδες λήψης και να λάβει τα υπόλοιπα δεδομένα από τον διακομιστή το συντομότερο

δυνατό. Για συσκευές κλάσης B, υποδεικνύει την προτεραιότητα των συγκρουόμενων χρονοθυρίδων ping που η τελική συσκευή πρέπει να ακούσει σε περίπτωση σύγκρουσης.

- **FOptsLen(FOpts Length):** Δηλώνει το μήκος σε bits του πεδίου FOpts. Αν λάβει την τιμή 0 σημαίνει ότι το πεδίο FOpts αφήνεται κενό.

❖ **FCtrl - UPLINK**

Όταν πρόκειται για απεσταλμένο πακέτο, τότε αποτελείται από τα εξής πεδία:

Πίνακας IX: Δομή του πεδίου FCtrl-Uplink[7]

Bits	[7]	[6]	[5]	[4]	[3...0]
FCtrl	ADR	ADR_ACK_Req	ACK	Class B	FOptsLen

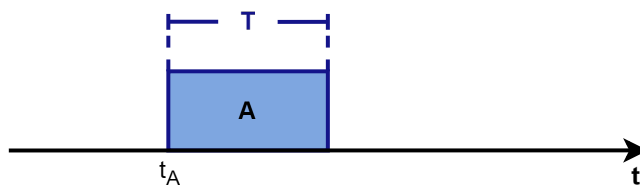
- **ADR_ACK_Req:** Εάν ADR είναι ενεργοποιημένο, το δίκτυο μπορεί να ελέγξει τον αριθμό των αναμεταδόσεων, το ρυθμό δεδομένων και την ισχύ μετάδοσης της συσκευής μέσω των κατάλληλων εντολών MAC. Εάν το ADR είναι απενεργοποιημένο, ο διακομιστής δικτύου πρέπει να αποδεχθεί ότι η τελική συσκευή μπορεί να μη δεχτεί οποιαδήποτε προσπάθεια ελέγχου του αριθμού των αναμεταδόσεων, του ρυθμού δεδομένων ή της ισχύος μετάδοσης της τελικής συσκευής, ανεξάρτητα από την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος. Το Δίκτυο μπορεί ακόμα να στέλνει εντολές για να ενημερώσει την τελική συσκευή για τη συνιστώμενη διαμόρφωση χρησιμοποιώντας την εντολή LinkADRReq. Κάθε τελική συσκευή πρέπει να αποδέχεται τους ελέγχους καναλιού που υπάρχουν στο LinkADRReq και πρέπει επίσης να απαντά σε όλες τις εντολές LinkADRReq με ένα LinkADRAAns που υποδεικνύει ποια στοιχεία εντολής έγιναν αποδεκτά και ποια απορρίφθηκαν.
- **Class B:** Όταν το bit τεθεί σε 1, σε μια αποστολή μηνύματος, σηματοδοτεί στον διακομιστή δικτύου ότι η τελική συσκευή έχει ενεργοποιήσει την κλάση B και είναι τώρα έτοιμη να λάβει προγραμματισμένα ping λήψης.

2.7.3. Επικοινωνία με Pure Aloha

Υπάρχουν πολυάριθμα πρωτόκολλα επιπέδου συνδέσμου για την επικοινωνία των συσκευών σε IoT συστήματα, τα οποία επιλέγονται με βάση τις απαιτήσεις και τους

περιορισμούς κάθε εφαρμογής. Κάποια από τα κριτήρια επιλογής περιλαμβάνουν την ενεργειακή κατανάλωση, την αξιοπιστία, και τη διεκπεραιωτική ικανότητα, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η τηλεπικοινωνιακή κίνηση και το κανάλι επικοινωνίας. Το Pure Aloha είναι ένα από τα πρώτα και πιο θεμελιώδη πρωτόκολλα πρόσβασης σε δίκτυα, αναπτυγμένο το 1968 από τον Norman Abramson στο Πανεπιστήμιο της Χαβάης. Αποτελεί μία από τις απλούστερες μεθόδους επικοινωνίας, όπου πολλαπλοί χρήστες μοιράζονται το ίδιο κανάλι. Βασίζεται σε μια στοχαστική προσέγγιση χωρίς κεντρικό έλεγχο, όπου σε κάθε τερματικό στο δίκτυο επιτρέπεται να μεταδίδει δεδομένα με πακέτα σταθερού μήκους, οποτεδήποτε καταφτάσουν στην είσοδό του, όποτε θέλει, χωρίς να περιμένει ή να ελέγχει αν το κανάλι είναι ελεύθερο.

Επειδή το κανάλι καθίσταται κοινόχρηστο με χρονική πολυπλεξία μεταξύ όλων των τερματικών, συχνά προκύπτει επικάλυψη της εκπομπής ενός τερματικού με την εκπομπή ενός άλλου. Σε αυτές τις περιπτώσεις αναπτύσσεται παρεμβολή μεταξύ των δύο ή περισσότερων εκπομπών η οποία «καταστρέφει» τα αντίστοιχα πακέτα. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει την ανάγκη για κάποια διευθέτηση του μηχανισμού προσπέλασης των τερματικών του δικτύου στο κοινό μέσο μετάδοσης. Σε περίπτωση που κάποιο τερματικό Α επιχειρήσει να στείλει πακέτο την χρονική στιγμή t_A και δεν υπάρχει άλλο τερματικό που να επιθυμεί να μεταδώσει εκείνο το διάστημα, τότε προκύπτει επιτυχής μετάδοση διάρκειας T .

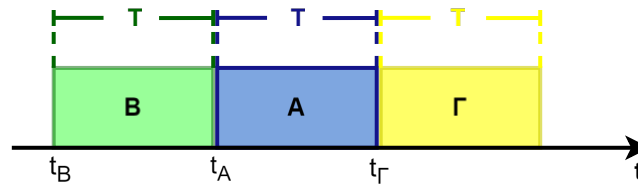


Εικόνα 12: Μετάδοση πακέτου με Pure Aloha

Η οριακή περίπτωση επιτυχούς αποστολής πακέτου για ένα τερματικό συμβαίνει όταν τα υπόλοιπα τερματικά ξεκινούν την μετάδοση νωρίτερα ή αργότερα, κατά ένα διάστημα ακριβώς ίσο με τον χρόνο μετάδοσης T . Με αυτήν την συνθήκη δεν υπάρχει αλληλοεπικάλυψη και τα πακέτα μπορούν να μεταδοθούν επιτυχώς, χωρίς να αλλοιωθούν.

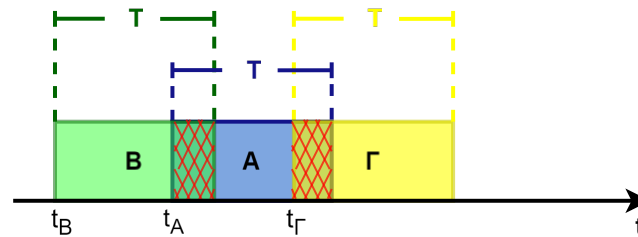
Με αναφορά το σχήμα της **Εικόνας 13**, παρατηρούμε ότι αν το πακέτο Α ξεκινήσει μετάδοση την χρονική στιγμή t_A , αποφεύγει τη σύγκρουση αφενός αν δεν υπάρχει ήδη στο κανάλι πακέτο Β του οποίου η εκπομπή άρχισε στο χρονικό διάστημα T πριν από την στιγμή t_A και αφετέρου αν δεν υπάρξει εκπομπή κανενός άλλου πακέτου Γ για

χρονικό διάστημα T μετά το t_A . Με άλλα λόγια, η σύγκρουση αποφεύγεται αν δεν υπάρξει κανένα πακέτο από άλλο τερματικό στο «ευάλωτο» χρονικό διάστημα $2T$, από το t_B έως το t_Γ του σχήματος.



Εικόνα 13: Οριακή επιτυχημένη μετάδοση Pure Aloha

Εξαιτίας όμως της απουσίας ελέγχου για την ενδεχόμενη κατάληψη του καναλιού από τα υπόλοιπα τερματικά, προκύπτουν συχνά «συγκρούσεις» μεταξύ πακέτων σε ταυτόχρονες μεταδόσεις.



Εικόνα 14: Σύγκρουση πακέτων σε Pure Aloha

Το Pure Aloha θεωρείται επομένως ένα στοχαστικό πρωτόκολλο επιπέδου συνδέσμου, καθώς ορίζεται από ένα σύνολο κανόνων που ανταποκρίνονται στην χρονικά τυχαία επιδίωξη μετάδοσης πακέτων από ένα πλήθος κόμβων. Η κατανομή πιθανοτήτων που περιγράφει καλύτερα αυτό το τυχαίο φαινόμενο είναι η Poisson. Αν υποθέσουμε λοιπόν ότι ένα πλήθος κόμβων N μοιράζεται το ίδιο κανάλι και ότι ο μέσος ρυθμός αποστολής πακέτων ανά κόμβο είναι λ , τότε ο συνολικός μέσος ρυθμός παραγωγής πακέτων στο σύστημα είναι ίσος με $r = N \cdot \lambda$. Η πιθανότητα κ κόμβοι να επιχειρήσουν μετάδοση σε ένα χρονικό διάστημα Δt διατυπώνεται σύμφωνα με την κατανομή Poisson, ως εξής:

$$P\{X = \kappa\} = \frac{(r \cdot \Delta t)^\kappa}{\kappa!} \cdot e^{-r \cdot \Delta t} \quad (12)$$

Όπως αναφέρθηκε, η μετάδοση ενός πακέτου χαρακτηρίζεται επιτυχής αν δεν υπάρξει κανένα πακέτο από άλλο τερματικό στο «ευάλωτο» χρονικό διάστημα $2T$. Αυτό

σημαίνει πως για χρονικό διάστημα ίσο με $2T$ πρέπει να μην επιδιώξει κανένα τερματικό να στείλει πακέτο. Η πιθανότητα αυτή υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{success} = P\{X = 0\} = \frac{(r \cdot 2T)^0}{0!} \cdot e^{-r \cdot 2T} = e^{-2rT} \quad (13)$$

και αντίστοιχα, η πιθανότητα σύγκρουσης υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{collision} = 1 - P\{X = 0\} = 1 - e^{-2rT} \quad (14)$$

Είναι προφανές ότι ο μηχανισμός Aloha χρειάζεται έναν τρόπο να διαχειρίζεται τα πακέτα που έχουν υποστεί σύγκρουση. Λόγω της απλότητας όμως που τον χαρακτηρίζει τα τερματικά δεν μπορούν να γνωρίζουν αν το πακέτο έφτασε στον προορισμό του ή αν συγκρούστηκε με ένα ή περισσότερα άλλα. Έτσι λοιπόν, έχει οριστεί ότι μόλις ο κόμβος-δέκτης του πακέτου λάβει το μήνυμα, πρέπει να στείλει ένα μήνυμα επιβεβαίωσης ώστε να ενημερώσει τον παραλήπτη πως το έλαβε. Ο κόμβος-πομπός από την μεριά του, αφού στείλει το πακέτο περιμένει μέχρι την χρονική στιγμή που θα λάβει την επιβεβαίωση ώστε να περάσει στην μετάδοση του επόμενου πακέτου αν υπάρχει. Υπάρχει ένα άνω φράγμα(timeout) στον χρόνο που περιμένει ο κόμβος-πομπός για την επιβεβαίωση και αν αυτό ξεπεραστεί, τότε θεωρεί ότι το μήνυμα θα έπρεπε να έχει φτάσει και άρα χάθηκε ή συγκρούστηκε κάπου κατά την αποστολή. Έτσι επιλέγει μία τυχαία χρονική στιγμή και επιχειρεί μία νέα προσπάθεια αναμετάδοσης του χαμένου πακέτου. Να αναφερθεί πως το Pure Aloha είναι ένα half-duplex πρωτόκολλο, δηλαδή υποστηρίζει την αμφίδρομη αλλά όχι ταυτόχρονη επικοινωνία ανάμεσα σε δύο τερματικά. Συνεπώς, σε περίπτωση που δύο τερματικά θέλουν να στείλουν μήνυμα σε ένα τρίτο, στο ίδιο κανάλι, μπορούν να προκύψουν αποτυχημένες μεταδόσεις με δύο τρόπους. Ο πρώτος αφορά την ταυτόχρονη αποστολή πακέτου από τα δύο τερματικά και έχει ως αποτέλεσμα τα δύο πακέτα να αλλοιώνονται αμοιβαία. Ο δεύτερος τρόπος αφορά την περίπτωση που το ένα τερματικό έχει στείλει το μήνυμά του στον παραλήπτη και αναμένει ένα μήνυμα επιβεβαίωσης, ενώ παράλληλα το άλλο τερματικό τυχαίνει να μεταδώσει το δικό του μήνυμα ταυτόχρονα με εκείνο της επιβεβαίωσης. Δεδομένου ότι το κανάλι δεν υποστηρίζει ταυτόχρονη μετάδοση στο κανάλι, τα μηνύματα συγκρούονται και τόσο η επιβεβαίωση όπως και το μήνυμα του

άλλου τερματικού δεν φτάνουν σωστά ή καθόλου, στον προορισμό τους. Συνεπώς και οι δύο μεταδόσεις κρίνονται ανεπιτυχείς.

Εξαιτίας της αναμετάδοσης των πακέτων που έχουν υποστεί σύγκρουση, πλέον ο συνολικός ρυθμός αποστολής πακέτων είναι ίσος με τον μέσο ρυθμό αποστολής νέων πακέτων μαζί με τον μέσο ρυθμό των επανεκπομπών.

$$R = r + r_{retransmission} \quad (15)$$

Έτσι η νέα πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης είναι η εξής:

$$P\{X = 0\} = \frac{(R \cdot 2T)^0}{0!} \cdot e^{-R \cdot 2T} = e^{-2RT} \quad (16)$$

Και αντίστοιχα η πιθανότητα αναμετάδοσης λόγω σύγκρουσης:

$$P_{retransmission} = 1 - e^{-2RT} \quad (17)$$

Ο μέσος ρυθμός αναμετάδοσης επομένως είναι ο εξής:

$$r_{retransmission} = P_{retransmission} \cdot R = R(1 - e^{-2RT}) \quad (18)$$

Στη συνέχεια από τις σχέσεις (1) και (4) προκύπτει:

$$R = r + r_{retransmission} = r + R(1 - e^{-2RT}) \quad (19)$$

Πολλαπλασιάζοντας με T έχουμε την εξής σχέση:

$$RT = rT + RT(1 - e^{-2RT}) \quad (20)$$

Ως γνωστόν η τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση ή αλλιώς ο χρόνος χρήσης ενός καναλιού ισούται με τον ρυθμό άφιξης πακέτων στο σύστημα προς τον ρυθμό εξυπηρέτησης αυτών. Έτσι, αφού ο χρόνος μετάδοσης είναι ίσος με T, ο ρυθμός εξυπηρέτησης ενός πακέτου είναι ίσος με $\mu = \frac{1}{T}$.

Έτσι, η τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση του δικτύου από νέα πακέτα προκύπτει ως εξής:

$$S = \frac{r}{\mu} = rT \quad (21)$$

ενώ η αντίστοιχα η τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση που συμπεριλαμβάνει και τις αναμεταδώσεις:

$$G = \frac{R}{\mu} = RT \quad (22)$$

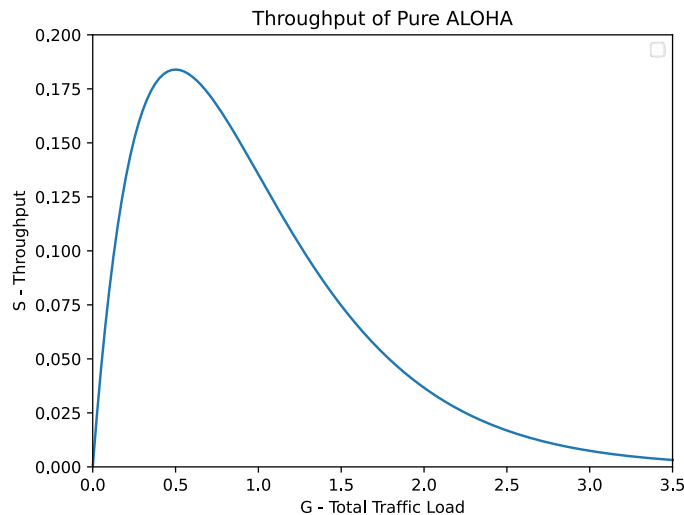
Αν λοιπόν αναδιαμορφώσουμε την σχέση (5) μέσω των σχέσεων (6) και (7), έχουμε:

$$G = S + G(1 - e^{-2G}) \quad (23)$$

Και αν λύσουμε την προκύπτουσα σχέση ως προς S καταλήγουμε:

$$S = Ge^{-2G} \quad (24)$$

Η σχέση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι συσχετίζει τον χρόνο χρήσης του καναλιού από νέα αιτήματα, δηλαδή που δεν αναμεταδίδονται, συναρτήσει του χρόνου χρήσης από το σύνολο των αιτημάτων μαζί με τις αναμεταδώσεις. Στην ουσία το S πολλές φορές ταυτίζεται με την διεκπεραιωτική ικανότητα του δικτύου(throughput), καθώς απεικονίζει πόσα νέα αιτήματα μπορεί να απορροφήσει το δίκτυο συναρτήσει του χρόνου. Παραγωγίζοντας ως προς την συνολική τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση G βρίσκουμε ότι για $G = 0.5$ προκύπτει η μέγιστη διεκπεραιωτική ικανότητα του καναλιού $S = 0,186 = 18,6\%$



Εικόνα 15: Διεκπεραιωτική ικανότητα Pure Aloha

Από το διάγραμμα της **Εικόνας 15** παρατηρούμε αρχικά ότι η διεκπεραιωτική ικανότητα του καναλιού αυξάνεται συναρτήσει της τηλεπικοινωνιακής συμφόρησης, καθώς το κανάλι δεν έχει έρθει σε κορεσμό υπάρχει περιθώριο να εξυπηρετήσει αιτήματα και με μεγαλύτερο ρυθμό. Μόλις η τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση ξεπεράσει την τιμή 0.5 ο ρυθμός παραγωγής νέων αιτημάτων είναι πολύ υψηλός και αρκετά πακέτα καταλήγουν να συγκρούονται προκαλώντας όλο και περισσότερες αναμεταδώσεις. Έτσι, η διεκπεραιωτική ικανότητα μειώνεται εκθετικά, μέχρι να μην μπορεί να εξυπηρετήσει κανένα νέο αίτημα.

Να επισημανθεί σε αυτό το σημείο ότι η θεωρητική απόδοση του πρωτοκόλλου Pure Aloha δεν επιτυγχάνεται και στις πρακτικές εφαρμογές εξαιτίας ορισμένων παραδοχών κατά την θεωρητική ανάλυση. Συγκεκριμένα στην θεωρία αγνοείται η εφαρμογή του περιορισμού στον χρόνο χρήσης του καναλιού από κάθε συσκευή (duty cycle policy) όπως επίσης απουσιάζει η χρήση μηνύματος επιβεβαίωση από τον διακομιστή προς την συσκευή, τα οποία μειώνουν την απόδοση.

Το πρωτόκολλο Pure Aloha συγκρινόμενο με άλλα πρωτόκολλα εμφανίζει χαμηλή διεκπεραιωτική ικανότητα, ωστόσο προτιμάται πολύ συχνά σε εφαρμογές IoT, λόγω της απλότητας και της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Για αυτόν τον λόγο συναντάται τακτικά σε δίκτυα LoRaWAN, σε επίπεδο ζεύξης.

Κεφάλαιο 3: Προσομοίωση

3.1. Χρήση Python

Η Python αποτελεί μια δημοφιλή γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου γενικής χρήσης, γνωστή για την ευκολία και την ευελιξία της. Χάρη στην πληθώρα των βιβλιοθηκών της χρησιμοποιείται ευρέως σε αρκετούς τομείς, όπως η επιστήμη δεδομένων, η μηχανική μάθηση, η ανάπτυξη ιστοσελίδων, η αυτοματοποίηση διεργασιών και η ανάλυση δεδομένων. Συμπληρωματικά διαθέτει ίσως την πιο ευρεία και ενεργή κοινότητα προγραμματιστών, η οποία προσφέρει υποστήριξη και πόρους στους χρήστες.

Στο πεδίο των προσομοιώσεων, η Python υποστηρίζει διαδραστική εκτέλεση, προσφέροντας τη δυνατότητα να πειραματιστεί κανείς σε πραγματικό χρόνο, να τροποποιήσει παραμέτρους και να παρακολουθήσει άμεσα τα αποτελέσματα των αλλαγών. Αυτό επιταχύνει την ανάλυση και την κατανόηση πολύπλοκων συστημάτων, δίνοντας τη δυνατότητα για συνεχή ανατροφοδότηση και βελτίωση των μοντέλων. Η απλότητά της στη σύνταξη και η σαφήνεια του κώδικα εξασφαλίζουν πως οι προσομοιώσεις μπορούν να επεκταθούν και να συντηρηθούν με ευκολία. Για τους παραπάνω λόγους η προσομοίωση αυτής της εργασίας δημιουργείται από την αρχή ως ένα αντικειμενοστραφές έργο σε γλώσσα Python χωρίς να βασίζεται στην χρήση οποιουδήποτε προγράμματος ή εξειδικευμένου εργαλείου αυτοματισμού.

Οι βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- ❖ **numpy**: Χρησιμοποιείται για αριθμητικούς υπολογισμούς και χειρισμό πολυδιάστατων πινάκων δεδομένων. Συμπληρωματικά, διαθέτει συναρτήσεις που αυτοματοποιούν διαδικασίες στην διαχείριση δομών δεδομένων όπως οι λίστες και δίνει την δυνατότητα αξιοποίησης μαθηματικών κατανομών πιθανότητας.
- ❖ **matplotlib**: Επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν εύκολα και γρήγορα γραφήματα που βοηθούν στην κατανόηση και την ανάλυση δεδομένων. Το **pyplot** είναι ένα υπό-πακέτο της βιβλιοθήκης, το οποίο παρέχει μία απλή, εύχρηστη διεπαφή για τη δημιουργία γραφημάτων και είναι σχεδιασμένο ώστε να λειτουργεί παρόμοια με τις συναρτήσεις σχεδίασης γραφημάτων της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB.

- ❖ **math:** παρέχει ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών συναρτήσεων και σταθερών, οι οποίες είναι απαραίτητες για την εκτέλεση βασικών και προχωρημένων μαθηματικών υπολογισμών. Η χρησιμότητά της έγκειται στο ότι περιλαμβάνει προκαθορισμένες λειτουργίες που επιταχύνουν και απλοποιούν τους υπολογισμούς χωρίς να χρειάζεται ο χρήστης να τις υλοποιήσει από το μηδέν.
- ❖ **IPython:** προσφέρει δυνατότητα για διαδραστική εμφάνιση αντικειμένων μέσω ορισμένων συναρτήσεων.

3.2. Περιγραφή συστήματος

Η προσομοίωση περιγράφει αλγοριθμικά ένα σύστημα που ορίζεται στο δημοσιευμένο έργο [19] του Tommaso Polonelli και της ομάδας του. Σκοπός της είναι να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ της θέσης των αρχικών παραμέτρων και των επιβεβαιωμένων αποτελεσμάτων που προκύπτουν στο [19], στην περίπτωση του Pure Aloha. Επομένως όπως στο [19], η προσομοίωση εκτελείται για δύο διαφορετικές επιλογές Spreading Factor, μία για την ελάχιστη τιμή SF6 και μία για την μέγιστη τιμή SF12.

Βάσει της τοπολογίας του δικτύου LoRaWAN που περιεγράφηκε στην ενότητα 2.2, ο προσομοιωτής επικεντρώνεται στο δίκτυο LoRa, δηλαδή στην επικοινωνία μεταξύ τελικών συσκευών(Nodes) και μιας, μοναδικής πύλης δικτύου(Gateway). Το κανάλι που εξετάζουμε αποτελεί ένα δυναμικό σύστημα, καθώς το πλήθος των κόμβων που περιέχονται σε αυτό δεν είναι σταθερό. Αρχικά φιλοξενείται μόνο ένας κόμβος και με κάθε παρέλευση ενός σταθερού χρονικού διαστήματος προστίθεται ακόμα ένας. Έτσι, αυξάνοντας τις συσκευές στο σύστημα μελετάμε βήμα-βήμα, μέσα από κάποιες μετρικές, πως αυτό ανταποκρίνεται στην μεταβολή της τηλεπικοινωνιακής συμφόρησης. Στην πράξη, αφού οριστούν οι παράμετροι για την επικοινωνία LoRa, οι κόμβοι ακολουθούν τους κανόνες του πρωτοκόλλου Pure Aloha και παράγουν με τυχαιότητα πακέτα, τα οποία αποστέλλουν προς την πύλη. Έπειτα αναμένουν μήνυμα επιβεβαίωσης ώστε να καθοριστεί η μετάδοσή τους επιτυχής ή ανεπιτυχής.

3.3. Παραδοχές

Για τη διασφάλιση της σαφήνειας της προσομοίωσης, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των παραδοχών που τη διέπουν. Ξεκινώντας από τις συνθήκες που ορίζονται στο [19], τίθεται ένα άνω φράγμα στο αυξανόμενο πλήθος των κόμβων του συστήματος ίσο με 1000. Θεωρούμε επίσης ότι όλες οι συσκευές LoRa βρίσκονται σε λειτουργία κλάσης A, για την επίτευξη της χαμηλότερης δυνατής κατανάλωσης ισχύος. Ωστόσο χάριν απλότητας, διατηρείται μόνο το πρώτο παράθυρο λήψης, RX1. Αναφορικά με το πρωτόκολλο ζεύξης, ο προσομοιωτής, βασίζεται στο Pure Aloha. Όπως αναλύθηκε στην ενότητα 2.7.3 είναι ένα half-duplex πρωτόκολλο, επομένως συγκρούσεις μπορούν να προκύψουν, τόσο στην αποστολή μηνύματος, όσο και κατά την λήψη του μηνύματος επιβεβαίωσης. Σε περίπτωση επανειλημμένων ανεπιτυχών μεταδόσεων, ορίζεται ότι κάθε κόμβος δικαιούται να προσπαθήσει για αναμετάδοση έως και 40 φορές. Από εκεί και πέρα το πακέτο απορρίπτεται και ο κόμβος συνεχίζει στην αποστολή επόμενου μηνύματος. Επειδή το κανάλι είναι κοινόχρηστο μεταξύ όλων των τερματικών, λογικό είναι κάθε κόμβος να προσπαθεί να διεκδικήσει όσο το δυνατόν περισσότερο χρόνο επικοινωνίας σε αυτό, με αποτέλεσμα να υπάρχουν ανισορροπίες και να μην ορίζεται ένα δίκαιο περιβάλλον για όλους. Την λύση στο πρόβλημα αυτό δίνουν οι προδιαγραφές του δικτύου LoRaWAN [7], μέσα από τον

Πίνακα X.

Πίνακας X: Κανονισμοί Duty Cycle

Aggregated during the first hour following power-up or reset	$T_0 < t < T_{0+1}$	Transmit time < 36 s per hour	1% duty cycle
Aggregated during the next 10 hours	$T_{0+1} < t < T_{0+11}$	Transmit time < 36 s per 10 h	0.1% duty cycle
After the first 11 hours, aggregated over 24 h, where N refers to days starting at 0	$T_{0+11} + N \times (24 \text{ hours/day}) < t < T_0 + 35 + N \times (24 \text{ hours/day}),$ $N \geq 0$	Transmit time < 8.7 s per 24 h	0.01% duty cycle

Συγκεκριμένα, ο κανονισμός προβλέπει ότι για συνεχόμενη λειτουργία δικτύου, μεταβάλλεται ο βαθμός στον οποίο μπορεί κάθε κόμβος να εκμεταλλευτεί το κανάλι για τις δικές του μεταδόσεις. Συγκεκριμένα, για λειτουργία έως και 1 συνεχόμενης ώρας, οι κόμβοι του συστήματος πρέπει να διεκδικούν κατά μέγιστον το 1% του χρόνου λειτουργίας του καναλιού, δηλαδή 36 δευτερόλεπτα. Μετά την 1 ώρα λειτουργίας,

μέχρι και τις 10 ώρες, οι κόμβοι οριοθετούνται με το μικρότερο ποσοστό του 0,1%, δηλαδή 36 δευτερόλεπτα ξανά αθροιστικά σε αυτό το χρονικό διάστημα. Τέλος για λειτουργία δικτύου μεγαλύτερη από 10 ώρες, οι κανονισμοί προβλέπουν μέγιστο ποσοστό χρήσης του καναλιού 0,01%, που αντιστοιχεί σε 8,7 δευτερόλεπτα ανά ημέρα. Για τους σκοπούς της παρούσης εργασίας, κρίνεται πιο δόκιμο, μέχρι το πέρας της προσομοίωσης να παραμένει σταθερή η διεκδίκηση χρόνου μετάδοσης από κάθε κόμβο και να μην οριοθετείται με διαφορετική αυστηρότητα κατά την μεταβολή της τηλεπικοινωνιακής συμφόρησης. Τίθεται λοιπόν το μέγιστο ποσοστό χρήσης του καναλιού από κάθε κόμβο ξεχωριστά ίσο με 1% σταθερά και έτσι το αποτέλεσμα της απόδοσης του δικτύου θα εξάγεται από μετρήσεις με ίδιους κανόνες.

3.4. Υλοποίηση Προσομοίωσης

3.4.1. Οντότητες προσομοιωτή

Όπως αναφέρθηκε, η προσομοίωση αποτελεί ένα αντικειμενοστραφές πρόγραμμα σε γλώσσα Python, επομένως οι βασικές οντότητες που συνυπάρχουν στο πλασματικό σύστημα αναπαρίστανται ως Κλάσεις(Classes). Έτσι, υπάρχει η κλάση του Κόμβου, της Πύλης και της Προσομοίωσης.

Η οντότητα του **Κόμβου(Node)** αντιπροσωπεύει την εκάστοτε συσκευή LoRa στο σύστημα και έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- **ID:** Ακέραιος αριθμός που ταυτοποιεί μοναδικά κάθε κόμβο στο σύστημα.
- **Εναπομένον χρόνος:** Ο χρόνος που απομένει σε κάθε κόμβο μέχρι να ολοκληρώσει μία μετάδοση
- **Στιγμή αναμετάδοσης:** Η τυχαία χρονική στιγμή που επιλέγει ένας κόμβος να αναμεταδώσει μετά από κάθε ανεπιτυχή μετάδοση
- **Αριθμός αναμεταδόσεων:** Ο αριθμός των επανειλημμένων αναμεταδόσεων ενός κόμβου μέχρι την επιτυχή μετάδοση. Μπορεί να λάβει τιμές από 0 έως 40.
- **Στιγμή εκκίνησης λήψης:** Η χρονική στιγμή που θα τεθεί ο κόμβος σε λειτουργία δέκτη(Rx), για την λήψη της επιβεβαίωσης.
- **Λήξη χρόνου αναμονής επιβεβαίωσης:** Η έσχατη χρονική στιγμή που θα περιμένει ο κόμβος μήνυμα επιβεβαίωσης από την πύλη.
- **Σύγκρουση:** Δηλώνει αν ο κόμβος κατά την μετάδοσή του έχει συμπέσει μαζί με άλλο κόμβο.
- **Λήψη επιβεβαίωσης:** Δηλώνει αν ο κόμβος έχει λάβει επιβεβαίωση για την τρέχουσα μετάδοση ή όχι.
- **Ποσοστό χρόνου λειτουργίας:** Η αναλογία του χρόνου που αντιστοιχεί σε κάθε κόμβο ώστε να υπάρχει δίκαιο καθεστώς στο κανάλι.
- **Χρόνος μετάδοσης:** Ο χρόνος που έχει μεταδώσει μέχρι στιγμής ένας κόμβος στα πλαίσια ενός βήματος αύξησης κόμβων.
- **Χρόνος αποχής από μετάδοση:** Ο τρέχων χρόνος που έχει συμπληρώσει ο κόμβος χωρίς να στείλει μήνυμα.

Η οντότητα της **Πύλης(Gateway)** είναι μοναδική στο σύστημα και έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- **Εναπομένων χρόνος επιβεβαίωσης:** Ο χρόνος που απομένει μέχρι η τρέχουσα μετάδοση της επιβεβαίωσης να ολοκληρωθεί.
- **Κατάσταση:** Η κατάσταση της πύλης. Μπορεί να είναι διαθέσιμη ή απασχολημένη όταν μεταδίδει μήνυμα.
- **Κόμβος αποστολής:** Το ID του κόμβου στον οποίο προορίζεται η αποστολή του μηνύματος επιβεβαίωσης.
- **Προσπάθειες επιβεβαίωσης:** Το πλήθος των προσπαθειών της πύλης να στείλει μήνυμα επιβεβαίωσης(επιτυχώς ή ανεπιτυχώς).
- **Επιτυχημένες επιβεβαιώσεις:** Το πλήθος των επιβεβαιώσεων που έχουν φτάσει επιτυχώς στον κατάλληλο κόμβο.

Η τελευταία οντότητα είναι αυτή της **Προσομοίωσης(Simulation)** και αποτελείται από τα εξής χαρακτηριστικά:

- **Αριθμός Κόμβων:** Ο συνολικός αριθμός των κόμβων στο σύστημα
- **Μεταδόσεις:** Ο αριθμός των μεταδόσεων για τον τρέχοντα αριθμό κόμβων
- **Επιτυχείς μεταδόσεις:** Οι επιτυχείς μεταδόσεις για τον τρέχοντα αριθμό κόμβων
- **Συγκρούσεις:** Ο αριθμός των συγκρούσεων για τον τρέχοντα αριθμό κόμβων
- **Συνολικές επιτυχείς μεταδόσεις:** Ο συνολικός αριθμός των επιτυχών μεταδόσεων στο σύστημα
- **Συνολικές μεταδόσεις:** Ο συνολικός αριθμός μεταδόσεων στο σύστημα
- **Συνολικές συγκρούσεις:** Ο συνολικός αριθμός συγκρούσεων στο σύστημα

3.4.2. Πιθανές καταστάσεις των κόμβων

Στην παρούσα προσομοίωση υπάρχουν τέσσερις καταστάσεις στις οποίες κάθε κόμβος μπορεί να βρίσκεται ανά πάσα στιγμή, ανάλογα με την αλληλεπίδρασή με το περιβάλλον του.

- ❖ Στην «**αρχική κατάσταση**» τοποθετούνται όλοι οι νέοι κόμβοι που εισάγονται στο σύστημα, καθώς και οι κόμβοι που είτε ολοκλήρωσαν επιτυχώς μία μετάδοση είτε εγκατέλειψαν την μετάδοση λόγω υπερβολικού αριθμού

αποτυχημένων προσπαθειών. Στην κατάσταση αυτή, οι κόμβοι επιλέγουν την στιγμή μετάδοσής τους σύμφωνα με την κατανομή Poisson και μια προκαθορισμένη μέση τιμή.

- ❖ Στην «**κατάσταση αναμετάδοσης**» βρίσκονται οι κόμβοι που δεν κατάφεραν να ολοκληρώσουν με επιτυχία την μετάδοση του πακέτου τους προς την πύλη και πρόκειται να προσπαθήσουν εκ νέου σε μία τυχαία χρονική στιγμή.
- ❖ Στην «**κατάσταση αναμονής προς επιβεβαίωση**» βρίσκονται όλοι οι κόμβοι που έχουν ολοκληρώσει την μετάδοσή τους, είτε επιτυχημένα είτε αποτυχημένα και αναμένουν να λάβουν την επιβεβαίωση, ή όχι, από την πύλη ώστε να βγάλουν το συμπέρασμα για το αποτέλεσμα της μετάδοσής τους.
- ❖ Στην «**κατάσταση μετάδοσης**» μεταβαίνουν οι κόμβοι όταν επιλέγουν να μεταδώσουν πακέτο και παραμένουν εκεί για διάρκεια ίση με Time on Air.

3.4.2. Προσδιορισμός παραμέτρων και αρχικοποίηση μεταβλητών

Πριν ξεκινήσει η λειτουργία του συστήματος στο πρόγραμμα της προσομοίωσης, χρειάζεται να οριστούν κάποιες βασικές παράμετροι. Ξεκινώντας από τις μεταβλητές που αφορούν την διαμόρφωση του σήματος LoRa, αρχικοποιήθηκαν οι μεταβλητές που φαίνονται στον **Πίνακα XI** για τις δύο περιπτώσεις SF6 και SF12.

Πίνακας XI: Παράμετροι διαμόρφωσης

Παράμετροι	SF6	SF12
Bandwidth	125 kHz	125 kHz
Preamble	8 symbols	8 symbols
Payload	25 bytes	25 bytes
Header	1	0
CRC	1	1
DE	0	1
CR	4	4

Κάποιες από τις παραμέτρους της διαμόρφωσης όπως το εύρος ζώνης(BW), το προοίμιο(preamble) η κεφαλίδα(header) και η βελτιστοποίηση του ρυθμού δεδομένων(DE) ορίστηκαν με αυτόν τον τρόπο λόγω περιορισμών από τους κανονισμούς του πρωτοκόλλου LoRa. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με το [15] το εύρος ζώνης καθορίζεται από την περιοχή του δικτύου ενώ τα σύμβολα που συνθέτουν το προοίμιο είναι σε αριθμό 8 αυστηρά, ανεξαρτήτως τοποθεσίας. Παρόλο που η χρήση της κεφαλίδας συνίσταται γενικότερα, το πρότυπο [7] ορίζει ως εξαίρεση την περίπτωση του SF6 και δεν επιτρέπει την εφαρμογή της με αυτήν την ρύθμιση (header = 1). Όσον αφορά την βελτιστοποίηση του ρυθμού δεδομένων, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.6.2, η λειτουργία ενεργοποιείται(DE = 1) όταν η διάρκεια του συμβόλου ξεπερνά τα 16msec. Στην περίπτωση του SF6 η διάρκεια συμβόλου σύμφωνα με την σχέση (6) στα 0,512 msec ενώ για SF12 υπολογίζεται στα 32,768 msec, επομένως έχει οριστεί ανάλογα η παράμετρος DE στις δύο περιπτώσεις.

Πέρα από τις παραμέτρους που χρειάζεται να υπακούν στους κανονισμούς του προτύπου LoRa για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος, απομένουν τρεις παράμετροι που η τιμές τους αφήνονται ως επιλογή στον διαχειριστή του δικτύου. Αυτές οι παράμετροι είναι η χρήσιμη πληροφορία(payload), ο κυκλικός έλεγχος για την διασφάλιση της ακεραιότητας των δεδομένων(CRC) και η αναλογία κωδικοποίησης(CR). Η χρήσιμη πληροφορία και η αναλογία κωδικοποίησης ορίζονται όπως και στο [19] με τιμές 25 bytes και 4 αντίστοιχα ενώ παράλληλα ο κυκλικός έλεγχος επιλέγεται να εφαρμοστεί και στις δύο περιπτώσεις έτσι να οριστεί ένα δίκαιο πλαίσιο σύγκρισης μεταξύ των δύο διαφορετικών ρυθμίσεων.

Αφού έχει ολοκληρωθεί η αρχικοποίηση των σχετικών παραμέτρων με την διαμόρφωση του σήματος LoRa, σειρά έχει ο υπολογισμός των χρονικών σταθερών του συστήματος. Συγκεκριμένα υλοποιήθηκαν συναρτήσεις που καλούνται στην αρχή του προγράμματος ώστε να υπολογιστεί η διάρκεια μετάδοσης του πακέτου(Time on Air) κατά την επικοινωνία αλλά και η διάρκεια του μηνύματος επιβεβαίωσης από την πύλη στους κόμβους. Εφαρμόζοντας την σχέση (11) και χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους της διαμόρφωσης του σήματος υπολογίστηκαν οι χρόνοι που φαίνονται στον **Πίνακα XII**.

Πίνακας XII: Χρονικές παράμετροι

Χρονική Παράμετρος	SF6	SF12
Time on Air	47 msec	1974 msec
Ack Duration	10 msec	663 msec

Πριν ξεκινήσει η λειτουργία του συστήματος, χρειάζεται να οριστούν παράμετροι σχετικές με τους κόμβους του συστήματος. Πρώτη σημαντική μεταβλητή είναι ο μέσος ρυθμός παραγωγής πακέτων ανά κόμβο. Παρόλο που υπάρχει έλεγχος για τον περιορισμό της χρήσης του καναλιού από κάθε κόμβο σύμφωνα με την πολιτική που του duty cycle, φροντίζουμε και η ίδια η αρχική πρόθεση των συσκευών για μετάδοση να πληροί αυτόν τον κανόνα. Ο ρυθμός παραγωγής πακέτων λοιπόν ορίζεται στο $\frac{1}{5}$ **πακέτα/sec** για SF6 και $\frac{1}{300}$ **πακέτα/sec** για SF12. Η τελευταία μεταβλητή που χρειάζεται να αρχικοποιηθεί είναι η σταθερή χρονική διάρκεια του βήματος που μεσολαβεί στην αύξηση των κόμβων του συστήματος. Για την περίπτωση του SF6 το βήμα ορίζεται στα **17 λεπτά** ενώ για SF12 στις **10 ώρες**. Ο λόγος που αυτές οι χρονικές παράμετροι έχουν αυτήν την μεγάλη διαφορά έγκειται στην επίσης μεγάλη διαφορά στην διάρκειας μετάδοσης. Με κάθε προσθήκη νέου κόμβου στο σύστημα, στην περίπτωση του SF12, προκαλείται σημαντική αύξηση της τηλεπικοινωνιακής συμφόρησης, διότι κάθε μετάδοση απαιτεί εκτεταμένη χρήση του καναλιού. Για τη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος με σταθερό και αξιόπιστο τρόπο, είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί ότι, στην περίπτωση του SF12, θα παρακολουθήσουμε τη μεταβολή για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα πριν καταλήξουμε σε συμπεράσματα για την απόδοση, ώστε να δοθεί στο κανάλι χρόνος να εξισορροπηθεί. Ακόμα, χρειάζεται να προσδιοριστεί η μέγιστη τιμή στην οποία οι κόμβοι θα επιλέγουν τυχαία την χρονική στιγμή αναμετάδοσης του μηνύματός τους. Το μέγιστο διάστημα αναμετάδοσης για κάθε κόμβο ορίζεται στα **20 sec** για SF6 και **100 sec** για SF12.

Τέλος, χρειάζεται να οριστούν κάποιες παράμετροι για τον προσδιορισμό της αναμονής από κάθε κόμβο για επιβεβαίωση από την πύλη. Ειδικότερα, το διάστημα μεταξύ της ολοκλήρωσης της μετάδοσης και της αλλαγής λειτουργίας του κόμβου σε δέκτη για την λήψη της επιβεβαίωσης, γνωστό ως RX Delay 1 τίθεται σύμφωνα με το [15] στο **1 sec**, ενώ ο μέγιστος χρόνος αναμονής για επιβεβαίωση από κάθε κόμβο ορίζεται ξανά στο [15] στο **1 sec**, όσο δηλαδή και η διάρκεια του παραθύρου RX1

3.4.3. Βασικός Βρόγχος επανάληψης

Η λειτουργία του συστήματος πλαισιώνεται στην εκτέλεση ενός βρόγχου όπου κάθε επανάληψή του ορίζει την πάροδο 1 msec στην διάρκεια της προσομοίωσης. Από εδώ και στο εξής θα αναφερόμαστε σε αυτήν την επανάληψη ως «κύκλος της προσομοίωσης». Μέσα σε αυτόν τον βρόγχο αυξάνονται οι συνολικοί κόμβοι ανάλογα με την συχνότητα που έχει οριστεί από το βήμα και καλούνται συναρτήσεις οι οποίες αναλαμβάνουν να εκτελούν εξατομικευμένες διαδικασίες και ελέγχους ώστε να τηρούν τους κανόνες που ορίζει το πρωτόκολλο.

Πιο συγκεκριμένα, καταμετρώνται αρχικά οι κόμβοι που πρόκειται να επιχειρήσουν αποστολή πακέτου στον τρέχοντα κύκλο. Έπειτα, γίνεται έλεγχος για τυχόν συγκρούσεις από μεταδόσεις που βρίσκονται σε εξέλιξη και στην συνέχεια ελέγχεται ποιες από αυτές έχουν ολοκληρωθεί ώστε να μεταβούν οι κόμβοι σε κατάσταση αναμονής για επιβεβαίωση. Συνεχίζοντας, αφού παρέλθει το κατάλληλο διάστημα αναμονής οι κόμβοι αντιλαμβάνονται αν η προσπάθεια επικοινωνίας τους κατέστη επιτυχής ή ανεπιτυχής και μεταβαίνουν στην κατάλληλη κατάσταση ανάλογα με το αποτέλεσμα. Τέλος, ανανεώνονται οι μετρικές απόδοσης του καναλιού σε κάθε κύκλο και απεικονίζονται τα γραφήματα ενημερωμένα με συχνότητα αυτήν του βήματος αύξησης των κόμβων.

Ο βρόγχος (άρα και η προσομοίωση) τερματίζει μόλις η τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση του καναλιού φτάσει την τιμή 2, όπως αναφέρει και στο έργο του [19] ο Polonelli.

3.4.4. Επιλογή κόμβων προς μετάδοση

Σε κάθε κύκλο οι υποψήφιοι κόμβοι για μετάδοση προκύπτουν από δύο καταστάσεις. Οι νέοι κόμβοι επιλέγονται από την αρχική κατάσταση, μέσω της κατανομής Poisson, σύμφωνα με τον τρέχοντα συνολικό μέσο ρυθμό παραγωγής πακέτων στο σύστημα. Αντιθέτως, οι κόμβοι που επιδιώκουν να αναμεταδώσουν, έχουν προεπιλέξει με τυχαίο τρόπο την στιγμή που θα το κάνουν και αναμένουν έως τότε στην κατάσταση αναμετάδοσης.

Η διαδικασία ξεκινάει με την τυχαία επιλογή του πλήθους των νέων υποψήφιων κόμβων και διαλέγει τυχαία τόσους σε αριθμό από την αρχική κατάσταση. Παράλληλα ελέγχει αν υπάρχουν κόμβοι που έχουν επιλέξει να αναμεταδώσουν εκείνη την χρονική

στιγμή. Μόλις συλλεχθούν όλοι αυτοί οι κόμβοι ελέγχεται αν τηρείται ο περιορισμός του duty cycle για την εκμετάλλευση του καναλιού από τον καθένα ξεχωριστά. Συγκεκριμένα, επαληθεύεται αν στα πλαίσια της προηγούμενης ώρας ο τρέχων χρόνος μετάδοσης κάθε κόμβου είναι μικρότερος από το 1%, δηλαδή τα 36sec. Σε περίπτωση που αυτό δεν ισχύει, τότε ο κόμβος επιστρέφει στην κατάσταση από την οποία προήλθε. Αν πρόκειται για την κατάσταση αναμετάδοσης υπολογίζεται τυχαία η επόμενη χρονική στιγμή για την νέα προσπάθεια αναμετάδοσης. Τέλος, οι κόμβοι που επιλέχθηκαν και πληρούν τις προϋποθέσεις, μετατίθενται σε κατάσταση μετάδοσης.

3.4.5. Έλεγχος για συγκρούσεις

Μετά την επιλογή των κόμβων προς μετάδοση, χρειάζεται σε κάθε κύκλο η διερεύνηση για τυχόν συγκρούσεις από μεταδόσεις που αλληλεπικαλύπτονται χρονικά. Οι περιπτώσεις που μπορεί να προκύψει σύγκρουση είναι δύο, οι ταυτόχρονες μεταδόσεις από κόμβους και η ταυτόχρονη μετάδοση μηνύματος από κόμβο με ένα μήνυμα της επιβεβαίωσης από την πύλη.

Ο τρόπος που ελέγχεται μία σύγκρουση βασίζεται στον αριθμό των κόμβων που μεταδίδουν παράλληλα και στην κατάσταση της πύλης («idle» ή «busy»). Συγκεκριμένα, σε περίπτωση που 2 ή περισσότεροι κόμβοι μεταδίδουν σε εκείνον τον κύκλο ταυτόχρονα προκύπτει αναμφισβήτητα σύγκρουση μεταξύ τους. Διαφορετικά, στην περίπτωση που ένας μόνο κόμβος μεταδίδει, ελέγχεται η κατάσταση της πύλης. Αν αυτή είναι «busy», δηλαδή απασχολημένη, σημαίνει ότι εκείνη την στιγμή βρίσκεται στα μέσα μίας μετάδοσης μηνύματος επιβεβαίωσης και προκύπτει σύγκρουση. Στην περίπτωση που μεταδίδει μόνο ένας κόμβος στο κανάλι, δεν προκύπτει κάποια σύγκρουση και το μήνυμα παραμένει ακλόνητο. Μόλις εντοπιστεί κάποια σύγκρουση, η κατάσταση των κόμβων που εμπλέκονται σε αυτήν αλλάζει σε «collided», δηλαδή συγκρουσμένος. Να διευκρινιστεί ότι ο κόμβος δεν το γνωρίζει σε αυτό το στάδιο και συνεχίζει την μετάδοσή του μέχρι αυτή να ολοκληρωθεί.

3.4.6. Έλεγχος για το τέλος μετάδοσης

Είναι προφανές ότι χρειάζεται κάποια διαδικασία να ελέγχει σε κάθε κύκλο αν οι τρέχουσες μεταδόσεις έχουν φτάσει στο πέρας τους. Αυτό επιτυγχάνεται με μία μεταβλητή που μειώνεται κατά 1msec σε κάθε κύκλο, ξεκινώντας από την αρχική τιμή ΤοΑ. Μόλις αυτή γίνει ίση με 0 σηματοδοτείται το τέλος της τρέχουσας μετάδοσης. Σε

αυτό το σημείο ο κόμβος χρειάζεται να τεθεί σε κατάσταση αναμονής για επιβεβαίωση από την πύλη.

3.4.7. Έλεγχος επιτυχούς μετάδοσης

Το στάδιο αναμονής για επιβεβαίωση είναι το πιο κρίσιμο για κάθε κόμβο, καθώς πρόκειται να αποκαλυφθεί αν η προσπάθειά του να επικοινωνήσει κατέστη επιτυχής. Πιο λεπτομερώς, σε κάθε κύκλο ελέγχεται για κάθε κόμβο, αν έλαβε την επιβεβαίωση που περιμένει ή αν ο μέγιστος χρόνος αναμονής του(timeout) έχει επέλθει. Όταν ένας κόμβος είναι έτοιμος να λάβει απάντηση και το μήνυμά του έχει φτάσει επιτυχώς στην πύλη, χωρίς σύγκρουση, τότε η πύλη ξεκινάει να μεταδίδει την απάντησή της προς αυτόν, αφού επέλθει πρώτα ο απαιτούμενος χρόνος RX Delay 1. Υπάρχει λοιπόν μία μεταβλητή που μειώνεται αντίστροφα και αντιπροσωπεύει την παράμετρο RX Delay 1, τον χρόνο δηλαδή που απομένει μέχρι να ξεκινήσει η αποστολή της επιβεβαίωσης. Μόλις ξεκινήσει η αποστολή της επιβεβαίωσης, μία άλλη μεταβλητή κρατάει τον εναπομείναντα χρόνο για την ολοκλήρωση της. Έτσι, αν η επικοινωνία λειτουργήσει χωρίς παρεμβολές, ο κόμβος λαμβάνει την επιβεβαίωση και επιστρέφει στην αρχική κατάσταση, έτοιμος για την επόμενη προσπάθεια επικοινωνίας. Διαφορετικά, αν περιμένει για τον μέγιστο χρόνο αναμονής και δεν λάβει απάντηση, υποθέτει ότι κάτι στάθηκε εμπόδιο στην επικοινωνία του με την πύλη και μεταβαίνει στην κατάσταση αναμετάδοσης. Εκεί θα επιχειρήσει την αποστολή του ίδιου μηνύματος σε μία μεταγενέστερη τυχαία χρονική στιγμή μεταξύ 1 msec και το μέγιστο διάστημα αναμετάδοσης, υπό την προϋπόθεση ότι δεν έχει ξεπεράσει τις 40 προσπάθειες αναμετάδοσης για το ίδιο μήνυμα. Αν αυτό συμβεί, τότε απορρίπτει το πακέτο και επιστρέφει στην αρχική κατάσταση επιδιώκοντας εκ νέου επικοινωνία με την πύλη.

3.4.8. Ενημέρωση των μετρικών επίδοσης

Οι βασικές μετρικές που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της επίδοσης του καναλιού είναι η τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση(G), η διεκπεραιωτική ικανότητα(S) και ο λόγος των συγκρούσεων(Collision Rate). Σε θεωρητικό πλαίσιο όταν εκτιμάται η συμπεριφορά ενός δικτύου βασισμένου σε πρωτόκολλο Pure Aloha και τα ενδεχόμενα σύγκρουσης ή επιτυχούς επικοινωνίας σε αυτό, χρησιμοποιούνται παράμετροι που περιγράφουν τα αποτελέσματα συναρτήσει κάποιων μέσων τιμών όπως ο μέσος ρυθμός παραγωγής πακέτων. Σε πρακτικό επίπεδο όμως, στα πλαίσια

μίας προσομοίωσης, χρειάζεται να παραχθούν οι τιμές των μετρικών που κρίνονται ενδιαφέρουσες μέσα από τα δεδομένα που συλλέγονται κατά την διάρκεια της λειτουργίας του πλασματικού συστήματος. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης προσομοίωσης η συλλογή των αποτελεσμάτων γίνεται στο τέλος του βασικού βρόγχου επανάληψης, με συχνότητα αυτή του βήματος αύξησης των κόμβων. Ωστόσο υπάρχουν και μεταβλητές που κρατούν και ενημερώνουν τα απαραίτητα δεδομένα σε κάθε κύκλο λειτουργίας, ώστε να υπολογιστούν οι βασικές μετρικές στο πέρας του βήματος.

Προκειμένου να διασφαλιστεί η σαφήνεια και η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων κρίνεται απαραίτητος ο ακριβής προσδιορισμός του τρόπου με τον οποίο υπολογίζονται οι βασικές μετρικές. Η τηλεπικοινωνιακή συμμόρφωση υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$G = \frac{ToA \cdot TotalTransmissions}{NodeStep} \quad (25)$$

όπου **ToA** ορίζεται η διάρκεια της μετάδοσης ενός πακέτου, **TotalTransmissions** θεωρείται το συνολικό πλήθος των μεταδόσεων που προέκυψαν μετάδοση και αναμετάδοση στην διάρκεια του βήματος αύξησης κόμβων και **NodeStep** ορίζουμε το ίδιο το βήμα αυτό. Η διεκπεραιωτική ικανότητα υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$S = \frac{ToA \cdot SuccessfulTransmissions}{NodeStep} \quad (26)$$

Όπου η μόνη διαφορετική μεταβλητή είναι η **SuccessfulTransmissions** και αντιπροσωπεύει τον αριθμό των επιτυχών μεταδόσεων στο διάστημα αύξησης των κόμβων. Ο λόγος των συγκρούσεων ορίζεται ως εξής:

$$CollisionRate = \frac{Collisions}{TotalTransmissions} \quad (27)$$

Όπου **Collisions** ορίζεται το πλήθος των συγκρούσεων που προέκυψαν στο διάστημα αύξησης των κόμβων.

Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν με την παραδοχή ότι τα πακέτα της επιβεβαίωσης από την πύλη στους κόμβους δεν επιφέρουν αλλαγές στο δίκτυο, ούτε ως προς την τηλεπικοινωνιακή συμμόρφωση, ούτε ως προς διεκπεραιωτική ικανότητα. Αν ωστόσο

θεωρηθεί ότι τα πακέτα επιβεβαιώσεων προκαλούν μία αξιόλογη επίδραση στο δίκτυο, οι δύο πρώτες μετρικές ορίζονται εκ νέου ως εξής:

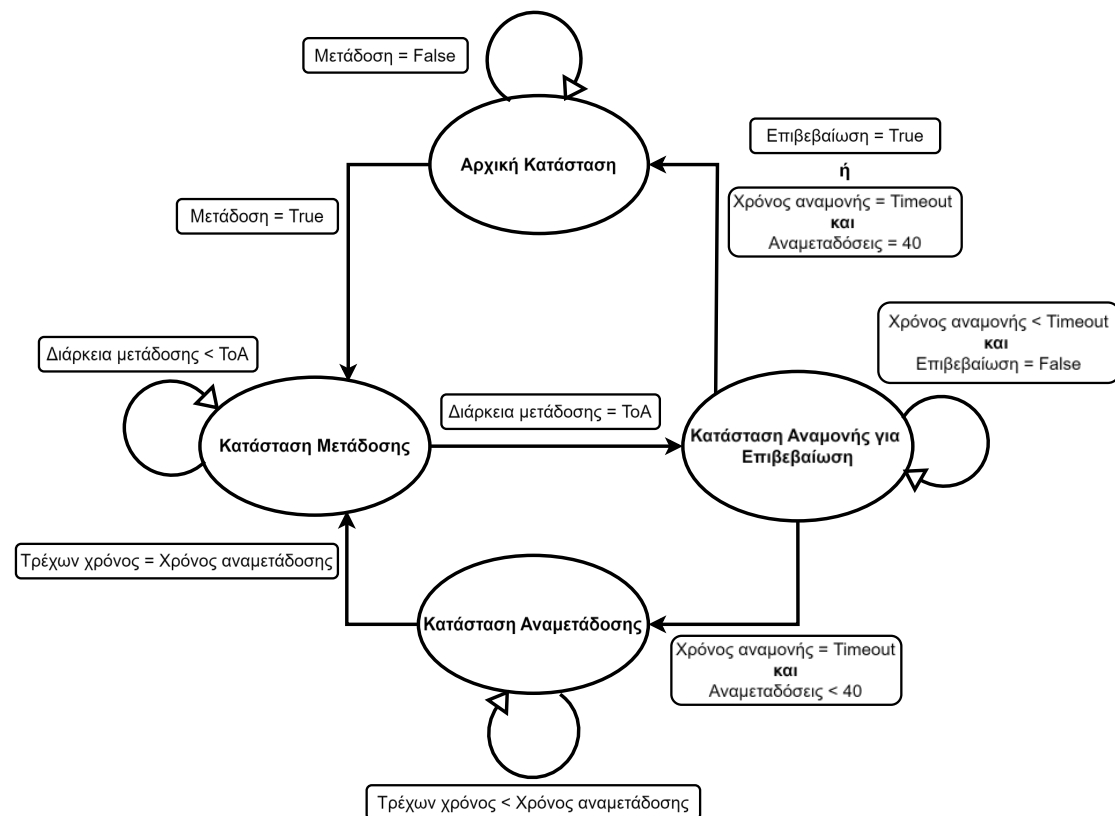
$$G = \frac{ToA \cdot TotalTransmisisions + AckDuration \cdot TotalAcks}{NodeStep} \quad (28)$$

$$S = \frac{ToA \cdot SuccessfulTransmissions + AckDuration \cdot SuccesfulAcks}{NodeStep} \quad (29)$$

όπου AckDuration θεωρείται η διάρκεια μετάδοσης ενός πακέτου επιβεβαίωσης, TotalAcks το πλήθος των συνολικών προσπαθειών μετάδοσης πακέτων επιβεβαίωσης και SuccessfulAcks το πλήθος των επιτυχών μεταδόσεων πακέτων επιβεβαίωσης από την πύλη στους κόμβους.

Ο λόγος των συγκρούσεων δεν επηρεάζεται, διότι και στις δύο περιπτώσεις τα πακέτα επιβεβαίωσης μπορούν να προκαλέσουν σύγκρουση με άλλα πακέτα.

Στην **Εικόνα 16** παρουσιάζεται ένα σχηματικό διάγραμμα που συνοψίζει την λειτουργία του προσομοιωτή.



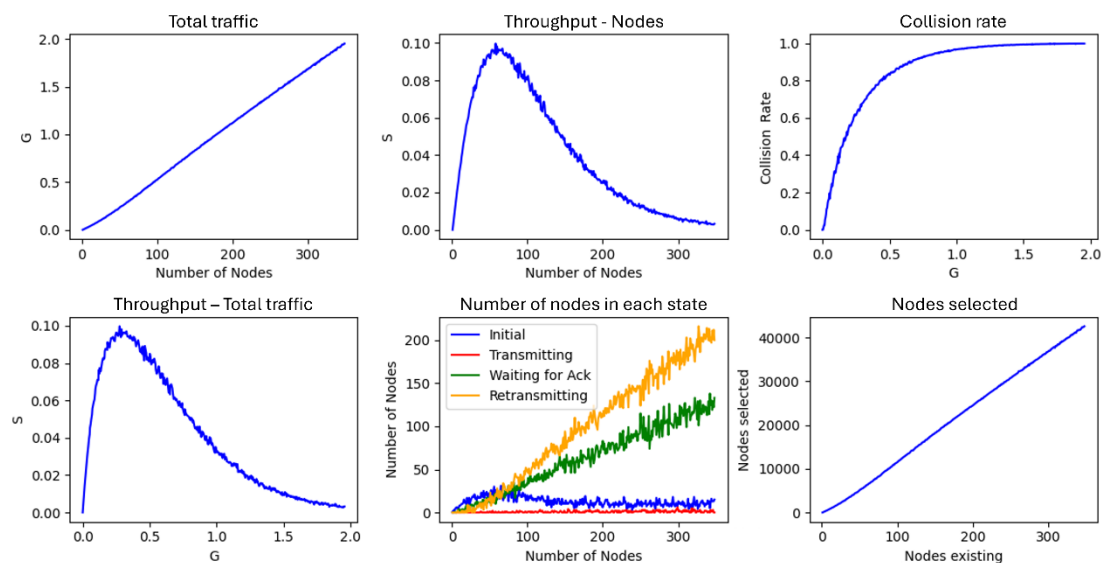
Εικόνα 16: Σχηματικό Διάγραμμα της Προσομοίωσης

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα και Συζήτηση

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα αποτελέσματα της απόδοσης του δικτύου στις δύο διαφορετικές περιπτώσεις, για SF6 και για SF12, συγκρίνονται παράλληλα με αυτά του έργου του Polonelli στο [19] και εξηγείται η συμπεριφορά του συστήματος μέσα από διάφορες μετρικές.

4.1. Μετρήσεις για SF6

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για SF6 παρουσιάζονται μέσα από 6 διαφορετικά γραφήματα στην **Εικόνα 17**. Κάθε γράφημα περιγράφει την ίδια διαδικασία από διαφορετική οπτική.

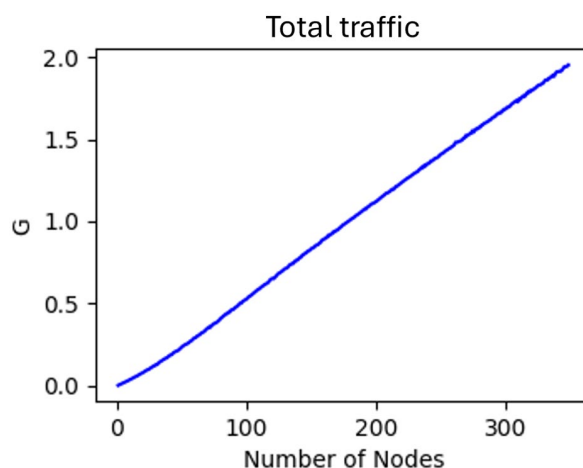


Εικόνα 17: Αποτελέσματα για SF6

Στο τέλος της προσομοίωσης εισήχθησαν 341 κόμβοι, οι επιτυχείς μεταδόσεις μετρήθηκαν στις 264.820 και οι συγκρούσεις στις 6.264.547. Επομένως, οι συνολικές προσπάθειες μετάδοσης πακέτων έφτασαν τις 6.535.949. Να διευκρινιστεί ότι οι μετρήσεις προκύπτουν χωρίς να ληφθεί υπόψιν η τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση και οι επιτυχημένες μεταδόσεις των πακέτων επιβεβαίωσης. Η επίδραση αυτών των πακέτων περιορίζεται στις συγκρούσεις, όπου και πάλι, αυτές χρεώνονται μόνο στα πακέτα των

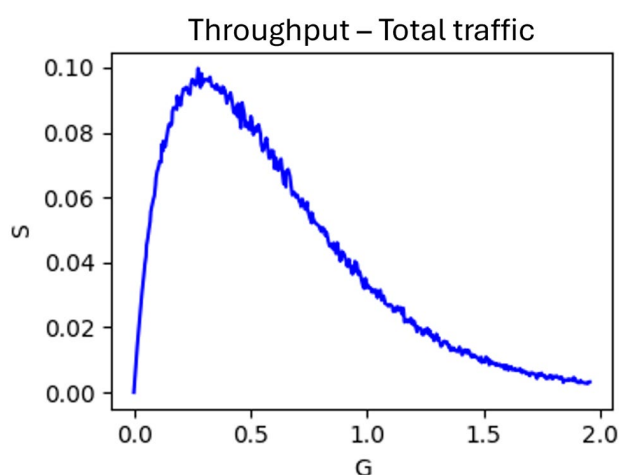
κόμβων και όχι στα πακέτα επιβεβαίωσης. Παρακάτω εξηγείται η μορφή κάθε διαγράμματος ξεχωριστά και διευκρινίζεται η φύση της πληροφορίας που απεικονίζει.

Στο διάγραμμα «Total traffic» της **Εικόνας 18** παρουσιάζεται η συνολική τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση από νέες μεταδόσεις και από αναμεταδόσεις, συναρτήσει της αύξησης των κόμβων στο σύστημα. Η προσομοίωση, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ολοκληρώνεται μόλις η τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση λάβει την τιμή 2.



Εικόνα 18: Τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση για SF6

Στο διάγραμμα «Throughput – Total traffic» της **Εικόνας 19** παρουσιάζεται η διεκπεραιωτική ικανότητα του καναλιού(S) συναρτήσει της συνολικής τηλεπικοινωνιακής συμφόρησης(G).

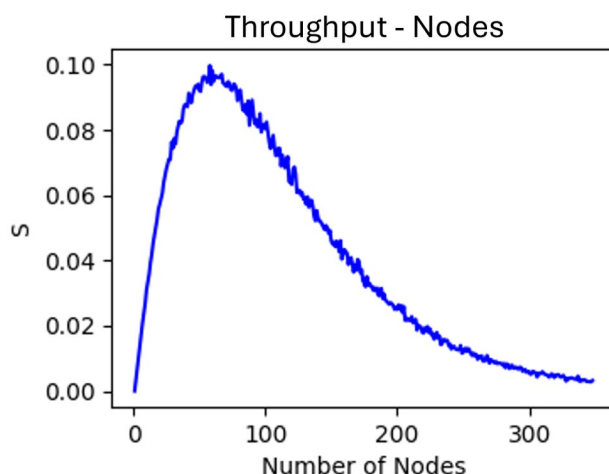


Εικόνα 19: Διεκπεραιωτική ικανότητα, συναρτήσει της συμφόρησης για SF6

Παρατηρείται αρχικά ότι η καμπύλη της διεκπεραιωτικής ικανότητας έχει την μορφή της κατανομής Poisson, όπως στην **Εικόνα 15**, που αναμένεται λόγω της χρήσης Pure

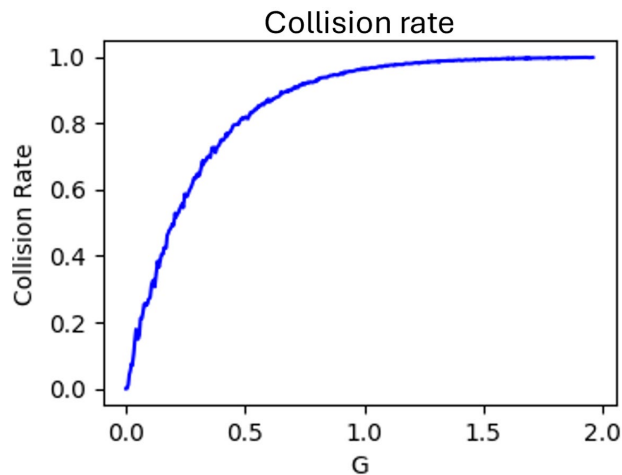
Aloha στο επίπεδο ζεύξης. Η καμπύλη αυξάνεται απότομα με μέγιστη τιμή το 0,1 ή 10% όταν η συμφόρηση λαμβάνει την τιμή 0,25 σε αντίθεση με την θεωρητική ανάλυση που επιτυγχάνεται τιμή 18,4% όταν η συμφόρηση φτάσει την τιμή 0,5. Το αποτέλεσμα αυτό κρίνεται αναμενόμενο στις πρακτικές εφαρμογές, όπως εξηγείται στην ενότητα 2.7.3. Τέλος την χρονική στιγμή που τερματίζει η προσομοίωση η καμπύλη της διεκπεραιωτικής ικανότητας βρίσκεται ελάχιστα πάνω από το 0.

Το διάγραμμα «Throughput – Nodes» της **Εικόνας 20** εμφανίζει την διεκπεραιωτική ικανότητα αναλογικά με τον αριθμό των κόμβων στο σύστημα. Επειδή η τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση παρουσιάζει προσεγγιστικά γραμμική συμπεριφορά και οι κόμβοι αυξάνονται σταθερά, τα δύο διαγράμματα της διεκπεραιωτικής ικανότητας μοιάζουν πολύ μεταξύ τους.



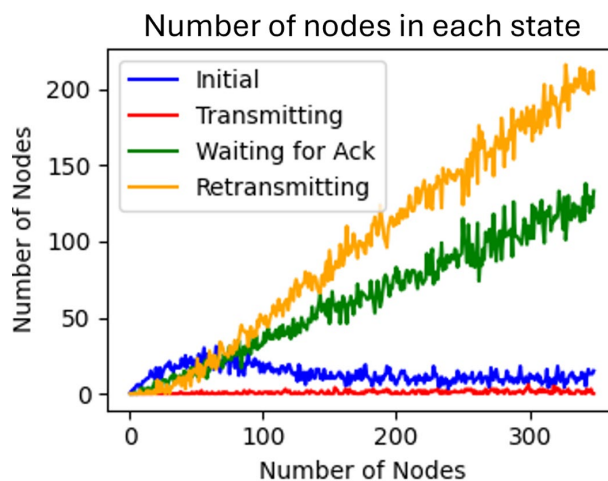
Εικόνα 20: Διεκπεραιωτική ικανότητα συναρτήσει του πλήθους κόμβων για SF6

Στο διάγραμμα «Collision rate» της **Εικόνας 21** η καμπύλη του λόγου συγκρούσεων, όπως είναι λογικό, αυξάνεται και μάλιστα λογαριθμικά, μέχρι να φτάσει στην τιμή 1 ή 100%, δηλαδή στο σημείο όπου η συμφόρηση είναι τόσο μεγάλη ώστε κάθε μετάδοση να καταλήγει σε σύγκρουση.



Εικόνα 21: Αναλογία συγκρούσεων για SF6

Το διάγραμμα «Number of nodes in each state» της **Εικόνας 22** παρουσιάζει τον αριθμό των κόμβων σε κάθε μία από τις 4 πιθανές διαφορετικές καταστάσεις τους.

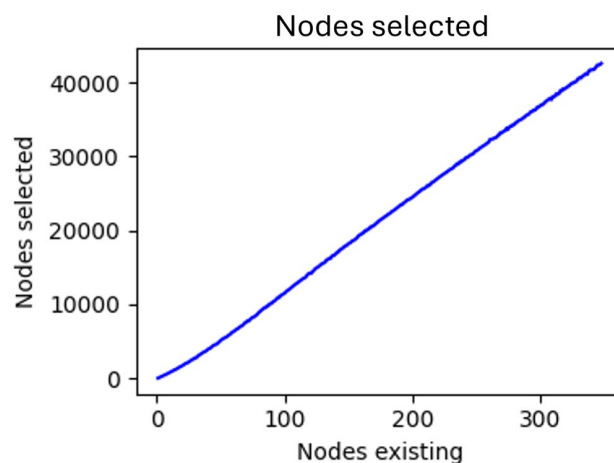


Εικόνα 22: Πλήθος κόμβων σε κάθε κατάσταση για SF6

Να διευκρινιστεί πως κάθε σημείο στο διάγραμμα αυτό αποτελεί στιγμιότυπο του συστήματος την στιγμή που λαμβάνονται οι μετρήσεις, στο τέλος κάθε βήματος αύξησης των κόμβων. Επομένως, η χρησιμότητά του αναδεικνύεται μακροπρόθεσμα και όχι βραχυπρόθεσμα, καθώς παρέχει μια γενικότερη ένδειξη για την κατανομή του πλήθους των κόμβων στις επιμέρους καταστάσεις, όσο αυξάνεται η τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση. Όπως είναι λογικό, το πλήθος των κόμβων στην κατάσταση αναμετάδοσης φαίνεται να αυξάνεται σταθερά και μάλιστα με πιο γρήγορο ρυθμό από τους κόμβους σε κατάσταση αναμονής προς επιβεβαίωση. Έτσι εξηγείται και η πτώση της διεκπεραιωτικής ικανότητας στο κανάλι από ένα σημείο και μετά. Παρόλο που η αρχική κατάσταση διαθέτει το μεγαλύτερο πλήθος κόμβων στο ξεκίνημα της

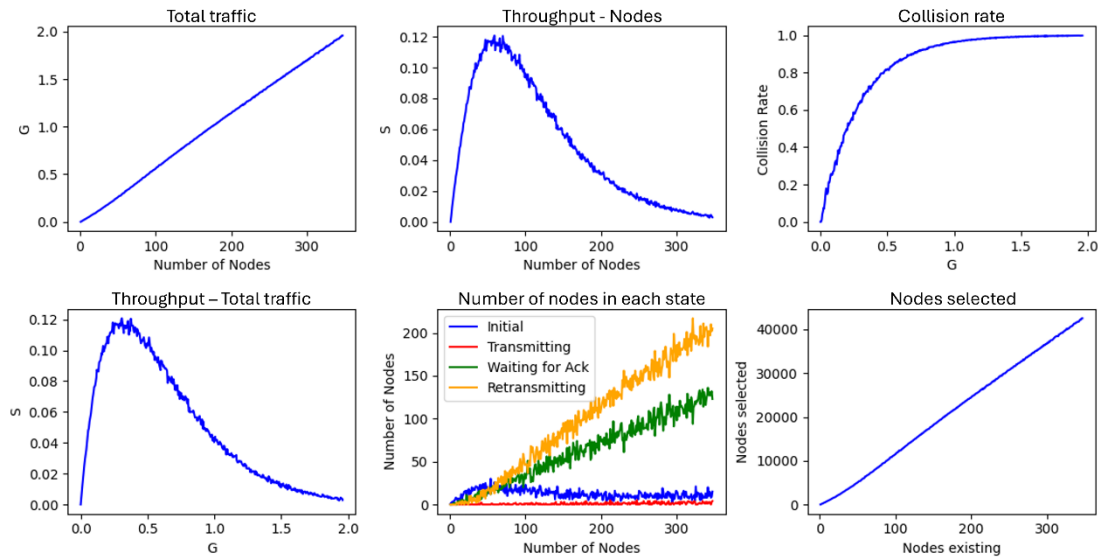
προσομοίωσης και η καμπύλη της αυξάνεται με αρκετά γρήγορο ρυθμό, στη συνέχεια το πλήθος της μειώνεται και παραμένει σχετικά σταθερό. Αυτό συμβαίνει διότι όταν αυξηθεί αρκετά η τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση, οι νέοι κόμβοι στο σύστημα καταλήγουν σε κατάσταση αναμετάδοσης αρκετά γρήγορα και επιχειρούν επαναλαμβανόμενες μεταδόσεις μέχρι να καταφέρουν να διεκπεραιώσουν την επικοινωνία τους. Τέλος η κατάσταση μετάδοσης, όπως είναι φυσικό διατηρεί το πλήθος των κόμβων της σχετικά σταθερό και αρκετά χαμηλό, διότι πιθανολογικά σε κάθε στιγμιότυπο δεν συμβαίνει να μεταδίδουν πολλοί κόμβοι εκείνο το χιλιοστό του δευτερολέπτου.

Τελευταίο έρχεται το διάγραμμα «Nodes selected» της **Εικόνας 23**, το οποίο απεικονίζει τον συνολικό αριθμό των κόμβων που επιλέγονται προς μετάδοση, αλλά και αναμετάδοση στην διάρκεια ενός βήματος αύξησης των κόμβων. Παρατηρούμε πως η μορφή της καμπύλης μοιάζει αρκετά με αυτήν της τηλεπικοινωνιακής συμφόρησης, καθώς σύμφωνα με την εξίσωση (25) συνδέονται άμεσα.



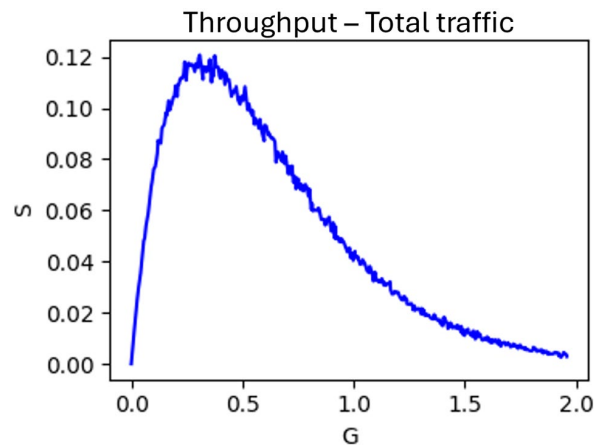
Εικόνα 23: Πλήθος των κόμβων που επιλέχθηκαν προς μετάδοση για SF6

Στην **Εικόνα 24**, τα αποτελέσματα συμπεριλαμβάνουν τόσο την τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση εξαιτίας των πακέτων επιβεβαίωσης, όσο και την διεκπεραιωτική ικανότητα που προκύπτει από τις επιτυχημένες μεταδόσεις τους.

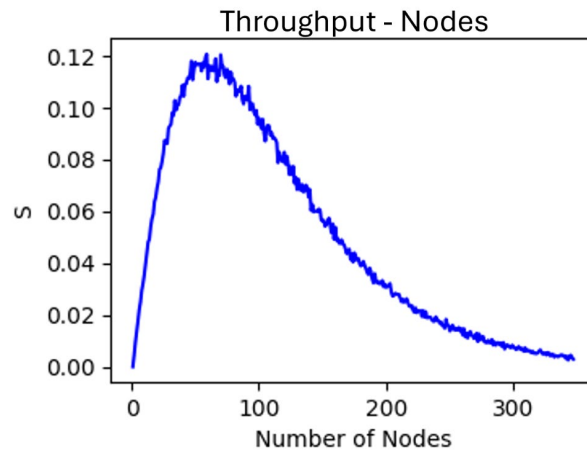


Εικόνα 24: Αποτελέσματα για SF6 με συμβολή των πακέτων επιβεβαίωσης

Στα περισσότερα γραφήματα δεν υπάρχει ιδιαίτερη διαφορά λόγω της συμβολής των πακέτων επιβεβαίωσης. Η μόνη σημαντική διαφορά παρατηρείται στα γραφήματα «Throughput – Total traffic» και «Throughput -Nodes», στην **Εικόνα 25** και **Εικόνα 26** αντίστοιχα, όπου η μέγιστη τιμή της διεκπεραιωτικής ικανότητας του καναλιού φαίνεται αυξημένη κατά 0,02, φτάνοντας την τιμή 0,12 ή 12%.

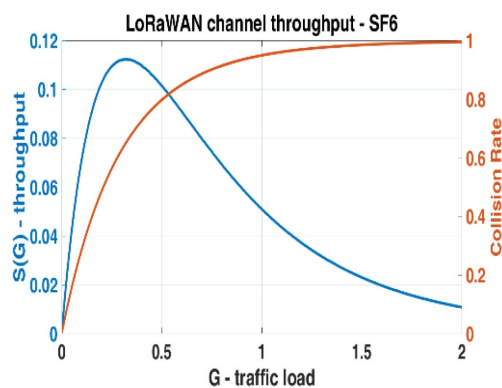


Εικόνα 25: Διεκπεραιωτική ικανότητα συναρτήσει της συμφόρησης για SF6, με συμβολή των πακέτων επιβεβαίωσης

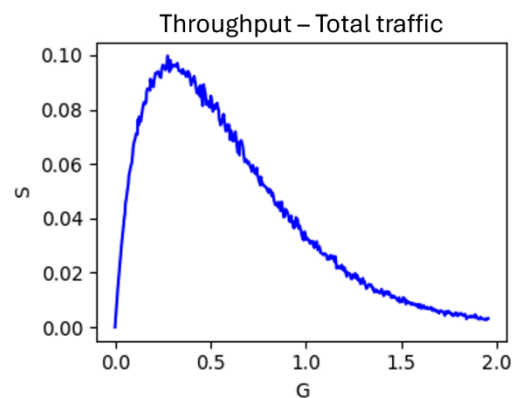


Εικόνα 26: Διεκπαιρωτική ικανότητα συναρτήσει του πλήθους κόμβων για SF6, με συμβολή των πακέτων επιβεβαίωσης

Στο τελευταίο σκέλος αυτής της ενότητας συγκρίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της παρούσης εργασίας, χωρίς συμβολή των πακέτων επιβεβαίωσης, με τα αντίστοιχα του Polonelli στο [19], για SF6 που φαίνονται στην **Εικόνα 27**. Ειδικότερα, στο [19] απεικονίζονται 2 καμπύλες σε ένα γράφημα, η διεκπαιρωτική ικανότητα και ο λόγος συγκρούσεων συναρτήσει της τηλεπικοινωνιακής συμφόρησης. Ξεκινώντας με την διεκπαιρωτική ικανότητα, τα διαγράμματα φαίνονται πανομοιότυπα, πέρα από την διαφορά στην μέγιστη τιμή κατά 0,01. Συγκεκριμένα, το διάγραμμα στο [19] φτάνει την τιμή 0,11 ενώ αυτό της παρούσης προσομοίωσης φτάνει στο 0,1.

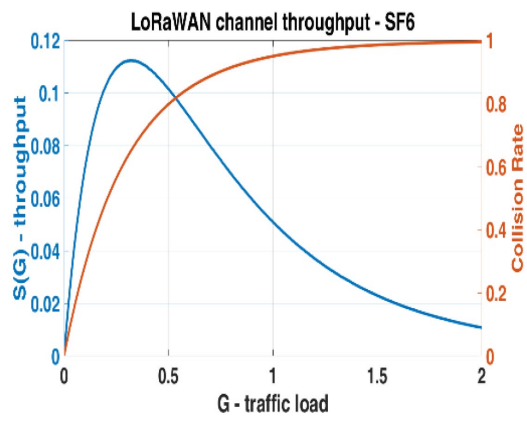


Εικόνα 27: Αποτελέσματα για SF6 από το [19]

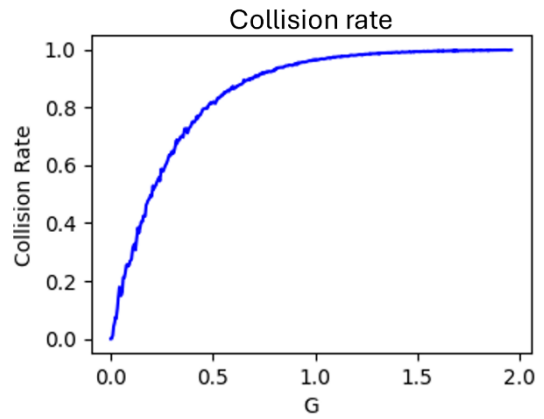


Εικόνα 19: Διεκπαιρωτική ικανότητα, συναρτήσει της συμφόρησης για SF6

Ως προς τον λόγο συγκρούσεων, δεν παρατηρείται ιδιαίτερη διαφορά. Και οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν σχεδόν ίδια κλίση στην αύξηση του λόγου συγκρούσεων.



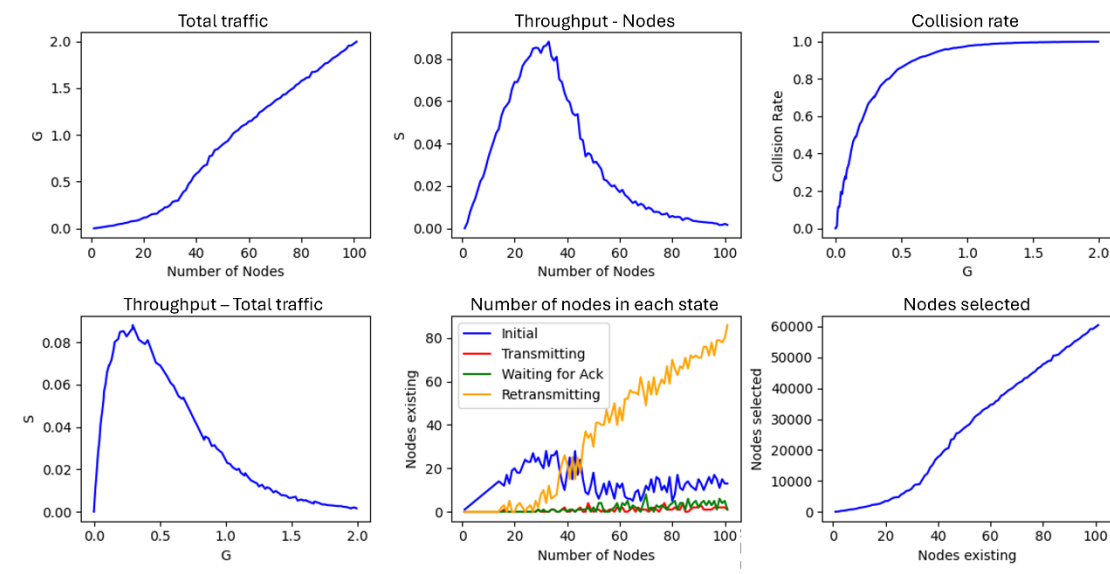
Εικόνα 27: Αποτελέσματα για SF6 από το [19]



Εικόνα 21: Αναλογία συγκρούσεων για SF6

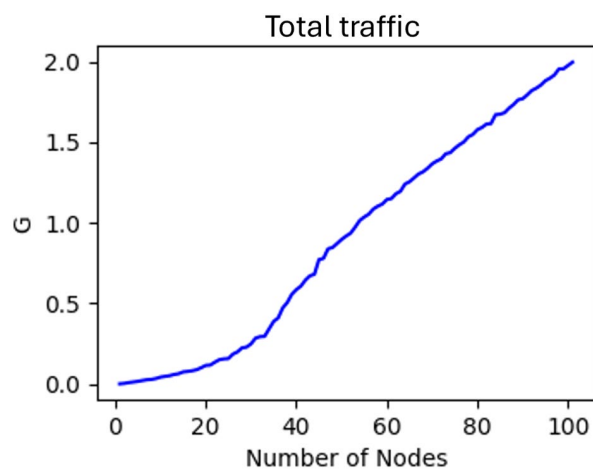
4.2. Μετρήσεις για SF12

Στην περίπτωση του SF12, τα αποτελέσματα απεικονίζονται μέσω των ίδιων 6 διαφορετικών διαγραμμάτων της **Εικόνας 28**. Στο τέλος της προσομοίωσης εισήχθησαν 101, ο αριθμός των επιτυχών μεταδόσεων μετρήθηκε στις 96.932 και ο αριθμός συγκρούσεων στις 2.626.370. Επομένως, οι συνολικές προσπάθειες για μετάδοση έφτασαν τις 2.723.304. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά η συμπεριφορά του καναλιού για κάθε ένα από τα διαγράμματα αυτά



Εικόνα 28: Αποτελέσματα για SF12

Στο διάγραμμα «Total traffic» της **Εικόνας 29** φαίνεται η τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης συναρτήσει των κόμβων του συστήματος.

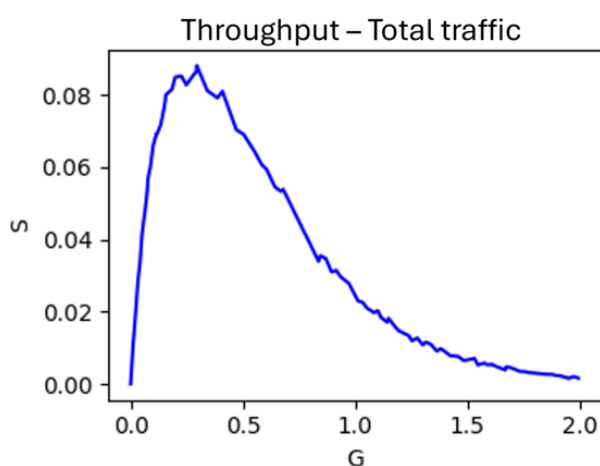


Εικόνα 29: Τηλεπικοινωνιακή συμφόρηση για SF12

Μέχρι την είσοδο 40 περίπου κόμβων στο σύστημα η καμπύλη φαίνεται εκθετικής μορφής, ενώ στην συνέχεια η κλίση σταθεροποιείται επιφέροντας γραμμικό χαρακτήρα. Αυτό οφείλεται στον περιορισμό του duty cycle. Συγκεκριμένα, αν αφαιρέσουμε τον περιορισμό, η κατανομή της τηλεπικοινωνιακής συμφόρησης θα προκύψει εκθετική, όπως αυτή στο παραδοσιακό Pure Aloha. Με την εφαρμογή του όμως τίθεται ένα όριο στην χρήση του καναλιού από κάθε κόμβο και η συμπεριφορά καταλήγει περίπου γραμμική στο όριο εκείνο. Στην αρχή της προσομοίωσης ο λόγος συγκρούσεων είναι πολύ μικρός και δεν προκύπτουν πολλές αναμεταδόσεις. Συνεπώς, οι κόμβοι του συστήματος δεν φτάνουν στο άνω όριο χρήσης και το διάγραμμα της συμφόρησης G εξελίσσεται εκθετικά, όπως στο παραδοσιακό Pure Aloha. Ωστόσο στο σημείο που οι κόμβοι γίνονται περίπου 40, ο λόγος συγκρούσεων έχει αυξηθεί αρκετά ώστε να προκύπτουν αλληπάλληλες αναμεταδόσεις από κόμβους στην προσπάθειά τους να επικοινωνήσουν επιτυχώς. Έτσι, η συμφόρηση αυξάνεται και συναντά τον περιορισμό του duty cycle που την οριοθετεί.

Η μέγιστη χρήση καναλιού ανά κόμβο ορίζεται σταθερή και το πλήθος κόμβων αυξάνεται γραμμικά. Γι' αυτόν τον λόγο η καμπύλη της τηλεπικοινωνιακής συμφόρησης μετατρέπεται σε γραμμική.

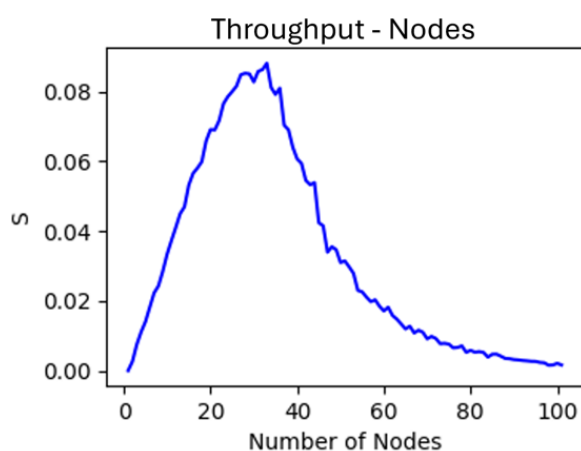
Το διάγραμμα «Throughput – Total traffic» φαίνεται στην **Εικόνα 30**. Αρχικά, διακρίνεται εύκολα η μορφή της κατανομής Poisson. Η καμπύλη αυξάνεται λογαριθμικά μέχρι η συμφόρηση να φτάσει την τιμή 0,25 και έπειτα μειώνεται μέχρι περίπου την τιμή 0 στο τέλος της προσομοίωσης.



Εικόνα 30: Διεκπεραιωτική ικανότητα συναρτήσει της συμφόρησης για SF12

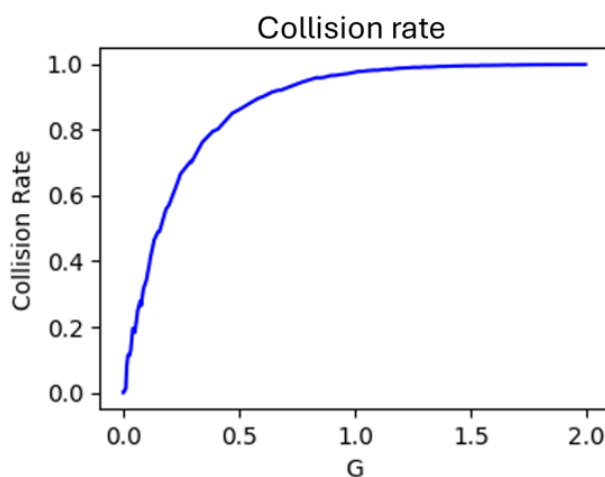
Το διάγραμμα «Throughput – Nodes» της **Εικόνας 31** δείχνει την διεκπεραιωτική ικανότητα του καναλιού συναρτήσει του αριθμού των κόμβων στο σύστημα. Διαφέρει

από το διάγραμμα «Throughput – Total traffic» στα στοιχεία που οι άξονες τους, δηλαδή ο ρυθμός αύξησης της καμπύλης στα δύο διαγράμματα επηρεάζεται από την κλίση των καμπυλών συμφόρησης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η συμφόρηση G αυξάνεται εκθετικά στο ξεκίνημα, δηλαδή γρηγορότερα σε σχέση με το σταθερά αυξανόμενο πλήθος κόμβων. Συνεπώς, αναμένεται και πιο απότομη άνοδο της διεκπεραιωτικής ικανότητας στο διάγραμμα «Throughput – Total traffic». Αντιθέτως, μετά την προσθήκη 40 κόμβων, ο ρυθμός ανόδου της συμφόρησης G μειώνεται, και έτσι η διεκπεραιωτική ικανότητα στο διάγραμμα «Throughput – Total traffic» φθίνει πιο αργά.



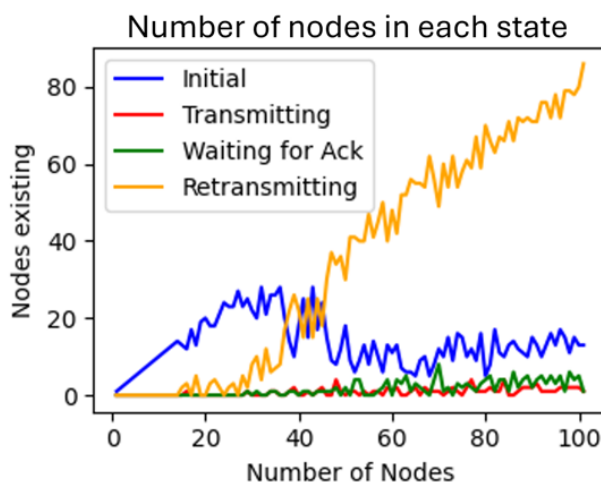
Εικόνα 31: Διεκπεραιωτική ικανότητα συναρτήσει του πλήθους κόμβων για SF12

Στο γράφημα «Collision rate» της **Εικόνας 32** παρουσιάζεται, καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης, ο λόγος συγκρούσεων των πακέτων συναρτήσει της τηλεπικοινωνιακής συμφόρησης. Η καμπύλη αυξάνεται λογαριθμικά, με μειούμενη κλίση και καταλήγει στην τιμή 1, δηλαδή στο σημείο που κάθε μετάδοση οδηγεί σε σύγκρουση.



Εικόνα 32: Λόγος συγκρούσεων για SF12

Το προτελευταίο διάγραμμα έχει τίτλο « Number of nodes in each state», παρατίθεται στην **Εικόνα 33** και εμφανίζει στιγμιότυπα από τον αριθμό των κόμβων σε κάθε κατάσταση μέχρι το πέρας της προσομοίωσης.

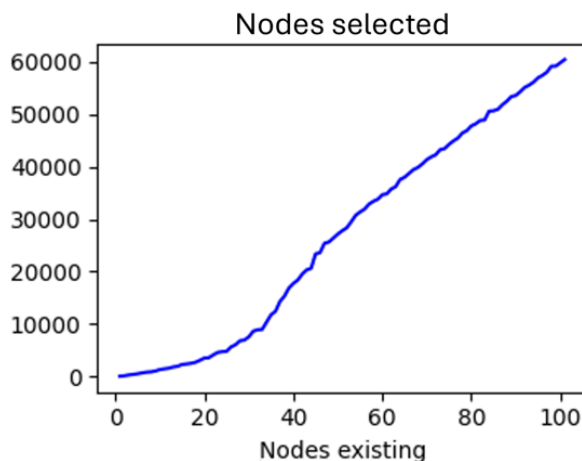


Εικόνα 33: Πλήθος των κόμβων σε κάθε κατάσταση για SF12

Όπως και για SF6 έχει νόημα να εξαχθούν συμπεράσματα μακροπρόθεσμα για τις επιμέρους καμπύλες του γραφήματος. Η καμπύλη «**Retransmitting**» αντιπροσωπεύει την κατάσταση της αναμετάδοσης και παρατηρείται ότι το πλήθος της αυξάνεται ταχύτατα και περισσότερο από κάθε άλλη κατάσταση, λόγω της αυξανόμενης συμφόρησης και των συγκρούσεων που προκύπτουν. Η καμπύλη «**Initial**» εκπροσωπεί την αρχική κατάσταση και παρόλο που αρχικά το πλήθος των κόμβων της αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό, μετά την προσθήκη 40 κόμβων στο σύστημα κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα. Δεν πρόκειται προφανώς για σύμπτωση, καθώς το πλήθος των 40 κόμβων συμπίπτει με το σημείο που η διεκπεραιωτική ικανότητα λαμβάνει την μέγιστη τιμή της. Από εκεί και στο εξής η πλειοψηφία των προσπαθειών για μετάδοση οδηγεί σε αναμεταδόσεις, συνεπώς οι κόμβοι δεν ολοκληρώνουν άμεσα την μετάδοσή τους και δεν επιστρέφουν στην αρχική κατάσταση, προκαλώντας έτσι αυτήν την φθίνουσα πορεία στην «**Initial**». Η καταστάσεις «Waiting for Ack» και «Transmitting» εκπροσωπούν την κατάσταση αναμονής για επιβεβαίωση και την κατάσταση μετάδοσης αντίστοιχα. Παραμένουν σταθερά σε πολύ χαμηλά επίπεδα με μία μικρή αύξηση στην πορεία της προσομοίωσης.

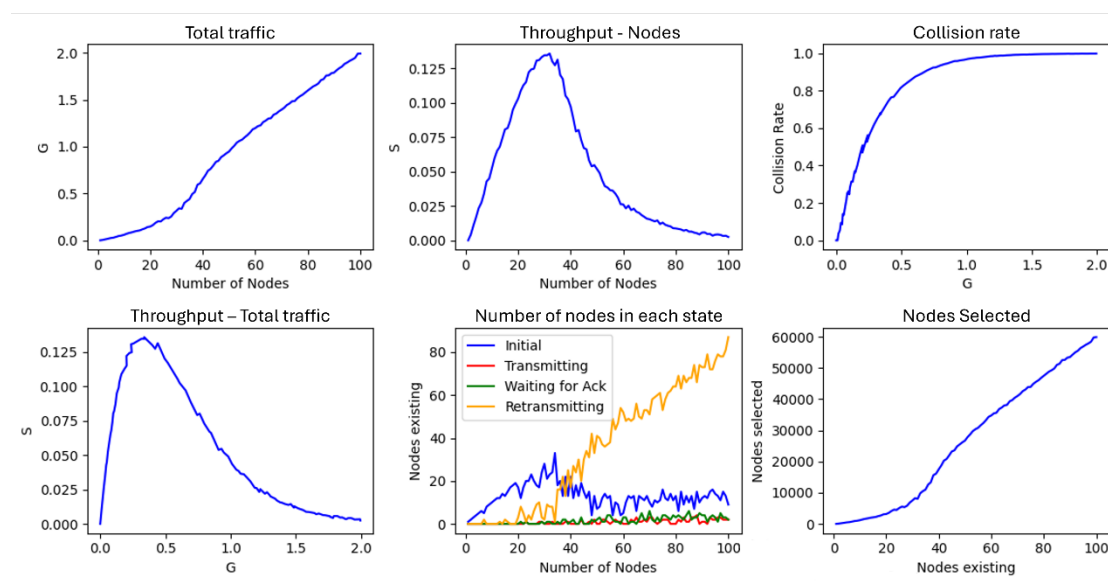
Το τελευταίο γράφημα στην **Εικόνα 34** ονομάζεται «**Nodes selected**» απεικονίζει τον συνολικό αριθμό των κόμβων που επιλέγονται προς μετάδοση και

αναμετάδοση στην διάρκεια ενός βήματος αύξησης των κόμβων. Όπως και στην περίπτωση του SF6, παρατηρούμε πως η μορφή της μοιάζει αρκετά με αυτήν της τηλεπικοινωνιακής συμφοράς στο διάγραμμα «**Total traffic**», καθώς σύμφωνα με την εξίσωση (25) συνδέονται άμεσα.



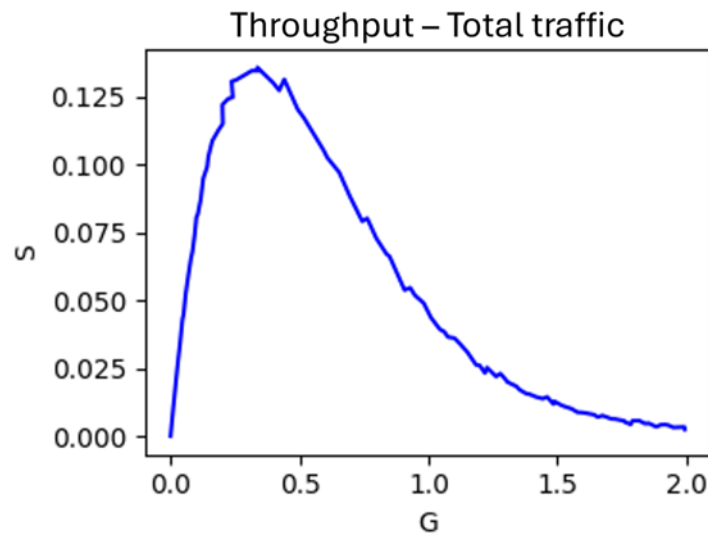
Εικόνα 34: Πλήθος των κόμβων που επιλέχθηκαν προς μετάδοση για SF12

Όπως και στην περίπτωση του SF6, δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στην μορφή των περισσότερων διαγραμμάτων λόγω της συμβολής των πακέτων επιβεβαίωσης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην **Εικόνα 35**. Στο τέλος της προσομοίωσης εισήχθησαν 100, ο αριθμός των επιτυχών μεταδόσεων μετρήθηκε στις 96.506 και ο αριθμός συγκρούσεων στις 2.659.825.

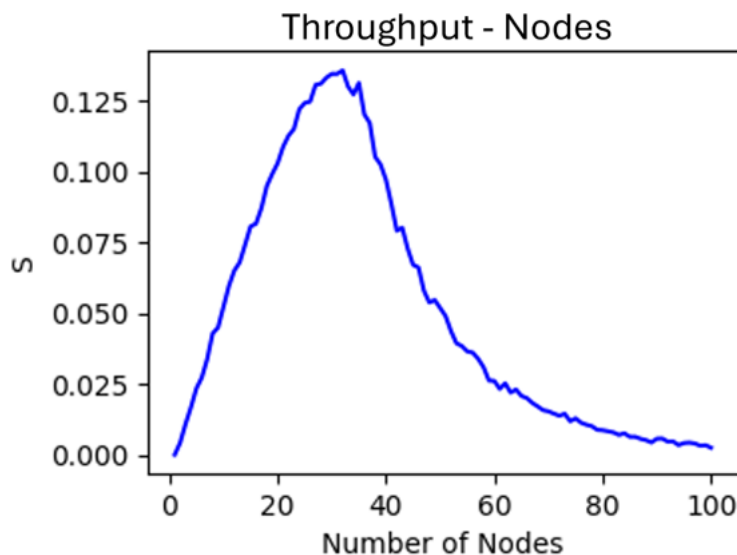


Εικόνα 35: Αποτελέσματα για SF12, με συμβολή των πακέτων επιβεβαίωσης

Η μόνη σημαντική διαφορά παρατηρείται στα γραφήματα «Throughput – Total traffic» και «Throughput -Nodes», στην **Εικόνα 36** και **Εικόνα 37** αντίστοιχα, όπου η μέγιστη τιμή της διεκπεραιωτικής ικανότητας του καναλιού φαίνεται αυξημένη κατά 0,05, φτάνοντας την τιμή 0,13 ή 13%.



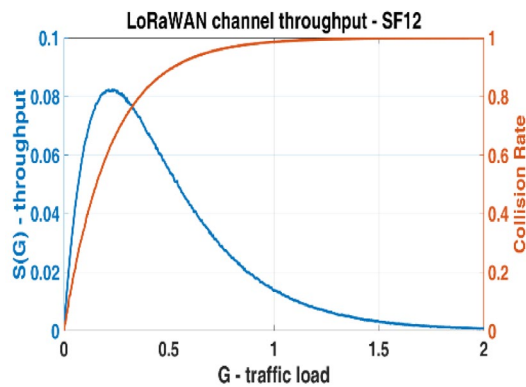
Εικόνα 36: Διεκπεραιωτική ικανότητα συναρτήσει της συμφόρησης για SF12



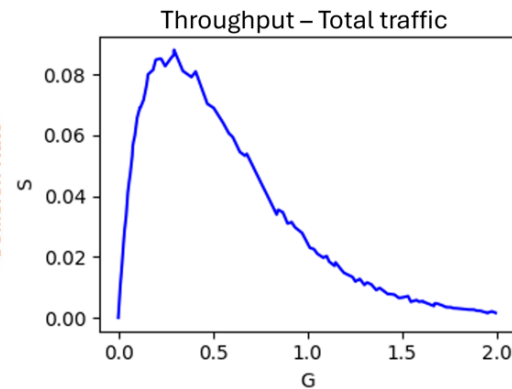
Εικόνα 37: Διεκπεραιωτική ικανότητα συναρτήσει του πλήθους κόμβων για SF12

Στην συνέχεια γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσης εργασίας, χωρίς συμβολή των πακέτων επιβεβαίωσης με αυτά στο [19]. Ξεκινώντας με την διεκπεραιωτική ικανότητα συναρτήσει της τηλεπικοινωνιακής συμφόρησης που

απεικονίζεται στην **Εικόνα 38** του [19] και την **Εικόνα 30** αυτής της προσομοίωσης δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφορές.

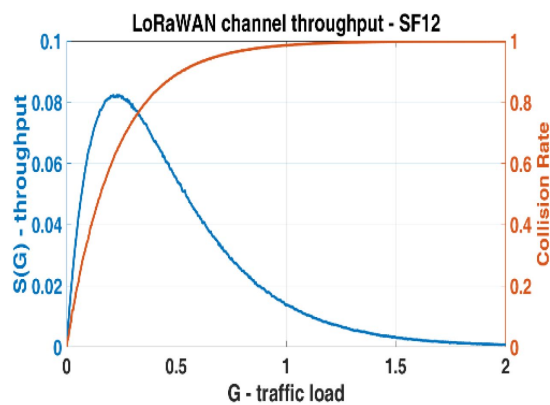


Εικόνα 38: Αποτελέσματα για SF12 από το [19]

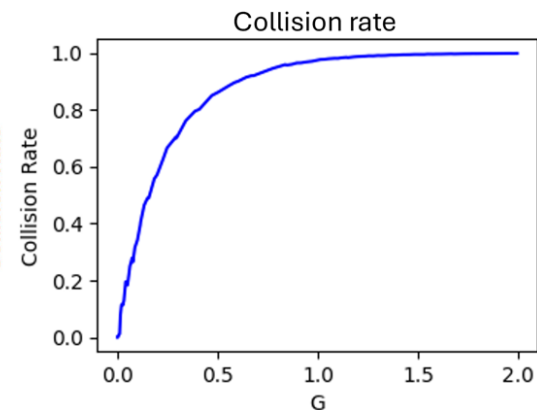


Εικόνα 30: Διεκπαιωτική ικανότητα συναρτήσει της συμφόρησης για SF12

Συνεχίζοντας με τον λόγο των συγκρούσεων, συγκρίνονται τα αποτελέσματα της **Εικόνας 38** του [19] με τα αποτελέσματα της **Εικόνας 32** και δεν παρατηρούνται επίσης αξιοσημείωτες διαφορές.



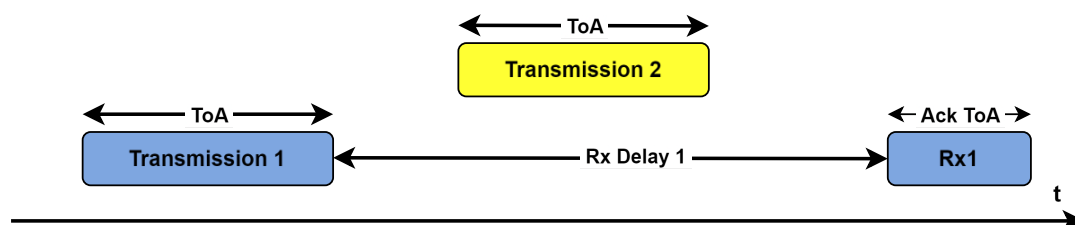
Εικόνα 38: Αποτελέσματα για SF12 από το [19]



Εικόνα 32: Λόγος συγκρούσεων για SF12

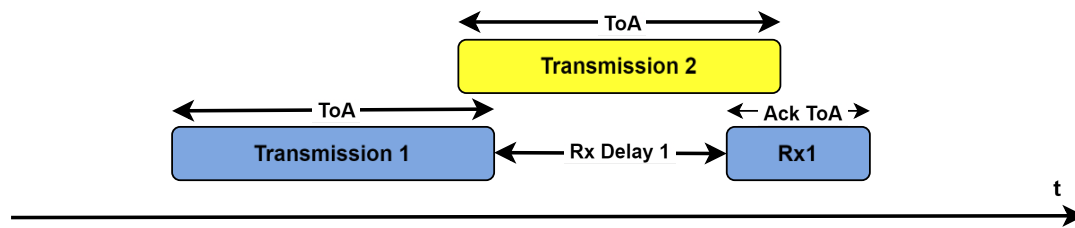
4.3. Σύγκριση Απόδοσης SF6 και SF12

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα, παρατηρείται ότι για SF12, η μέγιστη διεκπεραιωτική ικανότητα είναι χαμηλότερη κατά 2% και η εξήγηση έγκειται στην διάρκεια του διαστήματος RX Delay 1 σε σχέση με την διάρκεια μετάδοσης των πακέτων. Σύμφωνα με τον **Πίνακα XII**, στην περίπτωση του SF6, η διάρκεια μετάδοσης ισούται με 47 msec ενώ το διάστημα αναμονής RX Delay 1, σύμφωνα με τις προδιαγραφές [15], ορίζεται στο 1 sec, δηλαδή πολύ μεγαλύτερο. Επομένως, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 39**, όταν κάποιος κόμβος αναμένει για χρόνο RX Delay 1 πριν ανοίξει το παράθυρο λήψης, οποιοσδήποτε άλλος κόμβος προλαβαίνει εύκολα να μεταδώσει σε εκείνο το διάστημα επιτυχώς.



Εικόνα 39: Ευάλωτο διάστημα προς σύγκρουση για SF6

Ωστόσο, στην περίπτωση του SF12, σύμφωνα με τον **Πίνακα XII**, η διάρκεια μετάδοσης είναι ίση με 1449 msec, δηλαδή μεγαλύτερη από το διάστημα RX Delay 1.



Εικόνα 40: Ευάλωτο διάστημα προς σύγκρουση για SF12

Επομένως όπως φαίνεται στην **Εικόνα 22**, οποιοσδήποτε κόμβος κι αν προσπαθήσει να μεταδώσει σε αυτό το διάστημα, το πακέτο του θα συγκρουστεί, είτε με εκείνο του πρώτου κόμβου είτε με το πακέτο επιβεβαίωσης του. Συνεπώς, το ευάλωτο διάστημα για σύγκρουση σε αυτήν την περίπτωση, εκτός από την διάρκεια μετάδοσης περιλαμβάνει το RX Delay 1 αλλά και το παράθυρο λήψης RX1. Συμπεραίνεται λογικά ότι οι συγκρούσεις θα συμβαίνουν πιο συχνά και κατ' επέκταση η διεκπεραιωτική ικανότητα του καναλιού θα προκύψει μειωμένη.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και σημεία μελλοντικής διερεύνησης

Η εργασία αυτή συνεισφέρει στην κατανόηση και ανάλυση των προσομοιώσεων δικτύων LoRaWAN, σε επίπεδο ζεύξης. Με την λεπτομερή παράθεση του θεωρητικού υποβάθρου γύρω από τα δίκτυα LoRaWAN, εξηγήθηκαν τα πλεονεκτήματά τους και γνωστοποιήθηκαν τα στοιχεία που τα διαφοροποιούν από τα υπόλοιπα LPWANs. Αναλύθηκαν και υπολογίστηκαν διάφορες παράμετροι, γεγονός που καθιστά καταληπτή την βαρύτητα και τον τρόπο με τα οποία αυτές επηρεάζουν το δίκτυο. Παράλληλα αναφέρθηκαν περιορισμοί και παράμετροι που χρειάζεται να ληφθούν υπόψιν κατά τον σχεδιασμό των προσομοιώσεων αυτού του τύπου. Με την μελέτη του πρωτοκόλλου Pure Aloha στο επίπεδο ζεύξης ορίστηκαν οι κανόνες για την διαχείριση της επικοινωνίας στα πλαίσια της προσομοίωσης και διευκρινίστηκαν οι μετρικές με τις οποίες αξιολογείται η απόδοση ενός δικτύου.

Στο πρακτικό κομμάτι της υλοποίησης της προσομοίωσης αναλύθηκε αλγοριθμικά η μεθοδολογία για την διαχείριση κάθε ζητήματος σύμφωνα με αναφορές στην επιστημονική βιβλιογραφία. Για διάφορες λειτουργίες του δικτύου εξήχθησαν αποτελέσματα μετρήσεων, από διαφορετικές οπτικές, και ερμηνεύτηκαν αναλυτικά ώστε να επιτευχθεί βαθιά κατανόηση της συμπεριφοράς του δικτύου ανάλογα με τις μεταβολές στο πλασματικό σύστημα.

Ο σκοπός της εργασίας να διασαφηνίσει την διαδικασία των προσομοιώσεων σε δίκτυα LoRaWAN με χρήση Pure Aloha επιτεύχθηκε, καθώς η εγκυρότητα των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν επιβεβαιώνεται από την συμφωνία των αποτελεσμάτων με αναγνωρισμένα επιστημονικά άρθρα. Η εργασία μπορεί επίσης να προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες λειτουργώντας ως οδηγός για τον σχεδιασμό προσομοιώσεων σε δίκτυα LoRaWAN και ενδεχομένως να συναντήσει μελλοντικές επεκτάσεις σε μελέτη διαφορετικών πρωτοκόλλων πρόσβασης στο μέσο.

Βιβλιογραφία

- [1] C. Li, J. Wang, S. Wang, and Y. Zhang, “A review of IoT applications in healthcare,” *Neurocomputing*, vol. 565, p. 127017, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.neucom.2023.127017.
- [2] M. Soori, B. Arezoo, and R. Dastres, “Internet of things for smart factories in industry 4.0, a review,” *Internet Things Cyber-Phys. Syst.*, vol. 3, pp. 192–204, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.iotcps.2023.04.006.
- [3] M. Ilyas, “IoT Applications in Smart Cities,” in *2021 International Conference on Electronic Communications, Internet of Things and Big Data (ICEIB)*, Dec. 2021, pp. 44–47. doi: 10.1109/ICEIB53692.2021.9686400.
- [4] M. R. M. Kassim, “IoT Applications in Smart Agriculture: Issues and Challenges,” in *2020 IEEE Conference on Open Systems (ICOS)*, Nov. 2020, pp. 19–24. doi: 10.1109/ICOS50156.2020.9293672.
- [5] D. Ismail, M. Rahman, and A. Saifullah, “Low-power wide-area networks: opportunities, challenges, and directions,” in *Proceedings of the Workshop Program of the 19th International Conference on Distributed Computing and Networking*, in Workshops ICDCN '18. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Jan. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1145/3170521.3170529.
- [6] J.-P. Bardyn, T. Melly, O. Seller, and N. Sornin, “IoT: The era of LPWAN is starting now,” in *ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference*, Sep. 2016, pp. 25–30. doi: 10.1109/ESSCIRC.2016.7598235.
- [7] “TS001-1.0.4 LoRaWAN® L2 1.0.4 Specification.” Accessed: Aug. 08, 2024. [Online]. Available: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/ts001-1-0-4-lorawan-l2-1-0-4-specification>
- [8] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, “A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment,” *ICT Express*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.icte.2017.12.005.
- [9] “LoRaWAN Architecture,” The Things Network. Accessed: Sep. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>
- [10] “Characteristics and advantages | IoTNET.” Accessed: Oct. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.iotnet.eu/wp/characteristics-and-advantages/>

- [11] “Security,” The Things Network. Accessed: Oct. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/security/>
- [12] J. T. Castán, “The Things Network Integration Plugin,” Thinger.io. Accessed: Oct. 07, 2024. [Online]. Available: <https://thinger.io/the-things-network-integration-plugin/>
- [13] M. Chiani and A. Elzanaty, “On the LoRa Modulation for IoT: Waveform Properties and Spectral Analysis,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 5, pp. 8463–8470, Oct. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2019.2919151.
- [14] “What is the Technology Behind LoRa Frequency | antennas and accessories.” Accessed: Oct. 07, 2024. [Online]. Available: <https://interline.pl/Information-and-Tips/What-Technology-Behind-LoRa-Frequency>
- [15] “RP002-1.0.4 Regional Parameters.” Accessed: Sep. 04, 2024. [Online]. Available: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>
- [16] “Forward Error Correction and Code Rate,” The Things Network. Accessed: Sep. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/fec-and-code-rate/>
- [17] “SX1276.” Accessed: Sep. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276>
- [18] “Device Classes,” The Things Network. Accessed: Aug. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/classes/>
- [19] T. Polonelli, D. Brunelli, A. Marzocchi, and L. Benini, “Slotted ALOHA on LoRaWAN-Design, Analysis, and Deployment,” *Sensors*, vol. 19, no. 4, p. 838, Feb. 2019, doi: 10.3390/s19040838.