



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΕΥΦΥΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ»

RACH SUCCESS RATE

Μελέτη βελτιστοποίησης του Ρυθμού Επιτυχούς Προσβάσεως
σε υπηρεσία NB-IoT

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΕΡΓΙΟΥ ΧΡΗΣΤΟΣ

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Λούβρος Σπύρος, Διδάσκων ΠΜΣ

Συνεπιβλέπων: Παρασκευάς Μιχαήλ, Καθηγητής Παν. Πελοποννήσου

Πάτρα 2023

Τριμελής Επιτροπή

Δρ. Λούβρος Σπύρος, Διδάσκων ΠΜΣ

Παρασκευάς Μιχαήλ, Καθηγητής Παν. Πελοποννήσου

Αντωνόπουλος Χρήστος, Επικ. Καθηγητής Παν. Πελοποννήσου



Copyright, © Χρήστος Στεργίου, 2023

All rights reserved. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή του παρόντος έργου, εν όλω ή εν μέρει, για εμπορικούς σκοπούς. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικούς, εκπαιδευτικούς ή ερευνητικούς σκοπούς, με την προϋπόθεση ότι αναφέρεται η πηγή και διατηρείται η παρούσα ειδοποίηση. Ερωτήσεις σχετικά με τη χρήση της παρούσας διατριβής για κερδοσκοπικούς σκοπούς πρέπει να απευθύνονται στον συγγραφέα.

Η έγκριση της παρούσας εργασίας από το Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα.

Στην μνήμη του πατέρα μου...

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο των υποχρεώσεων για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Τεχνολογίες και Υπηρεσίες Ευφυών Συστημάτων Πληροφορικής και Επικοινωνιών» με κατεύθυνση «Προηγμένες Τεχνολογίες για την Εκπαίδευση» του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου.

Πρόκειται για μια προσπάθεια για τις ανάγκες της οποίας χρειάστηκε να διευρύνω τον τρόπο σκέψης, μελέτης και εργασίας, καθώς στο αποτέλεσμα αυτής έπρεπε να συνυπάρχουν η θεωρητική και σχηματική προσέγγιση μαζί με την εμπειρική διάσταση.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες της εργασίας, τους καθηγητές μου κ.Μιχαήλ Παρασκευά , κ. Σπύρο Λούβρο για την συνεργασία, καθώς τους διδάσκοντες στο συγκεκριμένο Πρόγραμμα διότι με βοήθησαν να γνωρίσω, από την επιστημονική του διάσταση, μια ανεξερεύνητη από εμένα θεματική περιοχή, σε σχέση με τις μέχρι τώρα σπουδές μου.

Ευχαριστώ επίσης, τα άτομα από το φιλικό και επαγγελματικό περιβάλλον που βοήθησαν στην εκπόνηση αυτής της εργασίας, ιδιαίτερα κατά τη διεξαγωγή της έρευνας.

Τέλος, ευχαριστώ τη σύζυγό μου Νικολίτσα η οποία, με τη συνεχή της συμπαράσταση και την αμέριστη υποστήριξή της, έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

Πίνακας περιεχομένων

Πίνακες εικόνων	6
Πίνακας πινάκων	7
Περίληψη	8
Abstract.....	9
Κεφάλαιο 1	10
1.1 Πρωτόκολλο Aloha.....	10
1.1.1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	10
1.1.2 Slotted Aloha.....	11
1.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΥΧΑΙΑΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΤΟ LTE (RACH).....	12
1.2.1 Σύντομη περιγραφή.....	12
1.2.2 Πριν την διαδικασία της Τυχαίας Πρόσβασης.....	14
1.2.3 Contention-based Random Access (CBRA)	15
1.2.4 Non Contention or Contention Free Random Access (CFRA).....	17
1.2.5 Physical Random Access Channel (PRACH).....	18
1.3 NB-IoT RACH Procedure.....	20
1.3.1 Φάση συγχρονισμού (Tsync)	20
1.3.2 Φάση ρύθμισης σύνδεσης (Tsetup).....	21
1.3.3 Φάση μεταφοράς δεδομένων (Tdata).....	21
1.3.4 Φάση αποσύνδεσης (Trelease).....	22
Κεφάλαιο 2	23
2.1 NB-IoT μη συγχρονισμένη RACH Procedure	23
2.2 NB-IoT RACH Related Parameters	23
2.3 NB-IoT RACH Operator configuration	25
2.4 NB-IoT RACH Performance approach.....	26
2.4.1 D.1 Collision Probability, P_c	26
2.4.2 D.2 RACH Success Probability per CE, ONLY due to Collision PRACH 32	
Κεφάλαιο 3	37
3.1 Προσομοιώσεις	38
3.1.1 D.2.Υπόθεση 1a:	39
3.1.2 D.2.Υπόθεση 1b:.....	39
3.1.3 D.2.Υπόθεση 1c:	40
3.1.4 D.2.Υπόθεση 2a:	40
3.1.5 D.2.Υπόθεση 2b:.....	41
3.1.6 D.2.Υπόθεση 3a:	41
Αναφορές	42

Παράρτημα.....44

Πίνακες εικόνων

Εικόνα 1:Επεξήγηση	10
Εικόνα 2: Τύποι του Aloha.....	11
Εικόνα 3: Χρονοθυρίδες στο slotted Aloha.	11
Εικόνα 4:Απεικόνιση του throughput.....	12
Εικόνα 5: Pss and Sss	14
Εικόνα 6: MIB - SIB.....	14
Εικόνα 7: CBRA	15
Εικόνα 8:CFRA.....	17
Εικόνα 9: Διαστασιολόγηση κυκλικών μετατοπίσεων.....	18
Εικόνα 10: Αντιστοίχιση ακολουθιών σύμφωνα με την παράμετρο rootSequenceIndex	19
Εικόνα 11: 3GPP (TS36.211) FDD Random Access Formats.....	19
Εικόνα 12: Preambles Format.....	19
Εικόνα 13: Ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ UE και eNB.....	20
Εικόνα 14: Επίπεδα βελτίωσης κάλυψης και επαναλήψεις.....	25
Εικόνα 15: NB-IoT Sub-Carrier Resources (Nscs).....	28
Εικόνα 16: PRACH, S, (0 \mapsto 0).....	39
Εικόνα 17: PRACH, S, (0 \mapsto 1).....	39
Εικόνα 18: PRACH, F, (0 \mapsto 2)	40
Εικόνα 19: PRACH, F, (1 \mapsto 1)	40
Εικόνα 20: PRACH, F, (1 \mapsto 2)	41
Εικόνα 21: PRACH, F, (2 \mapsto 2)	41

Πίνακας πινάκων

Πίνακας 1:Επεξηγήσεις συντομογραφιών.....	38
-------------------------------------------	----

Περίληψη

Το NarrowBand-Internet of Things (NB-IoT) είναι μια τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης που τυποποιήθηκε πρόσφατα από το 3GPP. Για την παροχή αξιόπιστων συνδέσεων με εκτεταμένη κάλυψη, εφαρμόζεται ένα σχήμα μετάδοσης επανάληψης τόσο στη διαδικασία του καναλιού τυχαίας πρόσβασης (RACH) όσο και στη μετάδοση δεδομένων. Σε αυτό το project, μελετούμε την βελτιστοποίηση του ρυθμού επιτυχούς προσβάσεως RACH Success Rate σε υπηρεσία NB-IoT λαμβάνοντας υπόψη την επαναλαμβανόμενη μετάδοση και τη σύγκρουση του προοιμίου.

Στο πρώτο κεφάλαιο αυτής της εργασίας περιγράφουμε το πρωτόκολλο Aloha και τον εκσυγχρονισμό του Slotted Aloha το οποίο μας βοηθάει να κατανοήσουμε καλύτερα από την μαθηματική περιγραφή. Έγινε πλήρη ανάλυση της ακολουθίας της σηματοδότησης και των λεπτομερειών που συνεπάγονται από την διαδικασία τυχαίας πρόσβασης στο LTE. Επίσης ασχολούμαστε με την διαδικασία τυχαίας πρόσβασης στο NB-IOT. Εξηγούμε το signaling flow όπου επεξηγεί πως γίνεται η διασύνδεση μίας συσκευής NB-IoT στο δίκτυο. Επιπρόσθετα επεξηγούμε το κάθε βήμα αναλυτικά από το flow diagram.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσουμε ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο θα μελετάει την διαδικασία εισόδου της συσκευής στο δίκτυο NB-IoT σε σχέση με τον αριθμό των συνδρομητών και τις παραμετροποιήσιμες 3GPP παραμέτρους. Τέλος εξάχθηκε η ακριβής έκφραση της πιθανότητας αποτυχίας RACH σε διάφορες προσεγγίσεις.

Στο τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο της παρούσης εργασίας παρουσιάστηκαν τα συμπεράσματα με την μορφή παραμετρικών καμπυλών από τους τελικούς τύπους που αναδεικνύουν την πρόταση βελτιστοποίησης μας. Για να σχεδιάσουμε τις καμπύλες χρησιμοποιήσαμε τον λογισμικό Matlab που μας δίνει την ευκαιρία το Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου να το χρησιμοποιούμε δωρεάν.

Τέλος στο παράρτημα υπάρχει ο κώδικας που τρέξαμε στο Matlab για να παρουσιάσουμε τις παραμετρικές καμπύλες.

Abstract

NarrowBand-Internet of Things (NB-IoT) is a wireless access technology recently standardized by 3GPP. To provide reliable connections with extended coverage, a retransmission scheme is applied to both the random access channel (RACH) process and data transmission. In this project, we study the optimization of the RACH Success Rate in NB-IoT service considering the retransmission and preamble collision.

In the first chapter of this paper we describe the Aloha protocol and the modernization of Slotted Aloha which helps us to understand better than the mathematical description. A complete analysis of the signaling sequence and the details implied by the random access procedure in LTE is done; we also deal with the random access procedure in NB-IOT. We explain the signaling flow where it explains how an NB-IoT device is interfaced to the network. Additionally we explain each step in detail from the flow diagram.

In the second section we develop a mathematical model which studies the process of device entry into the NB-IoT network with respect to the number of subscribers and the configurable 3GPP parameters. Finally, the exact expression of the RACH failure probability in different approximations was extracted.

In the third and final section of this paper, the conclusions in the form of parametric curves from the final formulas were presented to highlight our optimization proposal. To draw the curves we used the Matlab software that the University of Peloponnese gives us the opportunity to use for free.

Finally in the appendix there is the code we ran in Matlab to present the parametric curves.

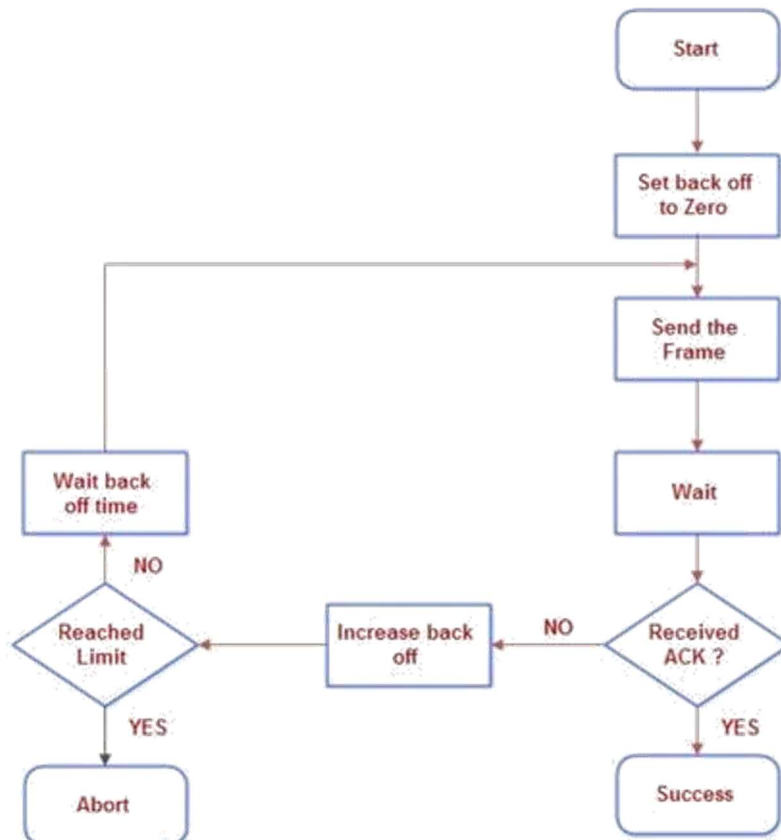
Κεφάλαιο 1

1.1 Πρωτόκολλο Aloha

Το Aloha είναι ένα σύστημα συντονισμού και διαιτητικής πρόσβασης σε ένα κανάλι κοινής επικοινωνίας δικτύων. Αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1970 από τον Norman Abramson και τους συναδέλφους του στο Πανεπιστήμιο της Χαβάης. Το αρχικό σύστημα που χρησιμοποιείται για ραδιοφωνικές εκπομπές βάσει εδάφους, αλλά το σύστημα έχει εφαρμοστεί σε συστήματα δορυφορικής επικοινωνίας. Ένα κοινό σύστημα επικοινωνίας όπως το Aloha απαιτεί μια μέθοδο χειρισμού συγκρούσεων που συμβαίνουν όταν δύο ή περισσότερα συστήματα προσπαθούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα στο κανάλι. Στο σύστημα Aloha, ένας κόμβος μεταδίδει κάθε φορά που υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για αποστολή. Εάν ένας άλλος κόμβος μεταδίδει ταυτόχρονα, συμβαίνει σύγκρουση και τα πλαίσια που μεταδόθηκαν χάνονται. Ωστόσο, ένας κόμβος μπορεί να ακούσει τις εκπομπές στο μέσο, ακόμη και το δικό του και να καθορίσει αν μεταδίδονται τα πλαίσια.

Το Aloha σημαίνει "Γεια σας". Το Aloha είναι ένα πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης στο data link layer και προτείνει τον τρόπο με τον οποίο οι πολλοί ακροδέκτες έχουν πρόσβαση στο μέσο χωρίς παρεμβολές ή σύγκρουση. Το 1972 ο Roberts ανέπτυξε ένα πρωτόκολλο που θα αυξήσει την ικανότητα του Aloha δύο φορές. Το πρωτόκολλο Slotted Aloha περιλαμβάνει τη διαίρεση του χρονικού διαστήματος σε διακριτές εγκοπές και κάθε διάστημα υποδοχής αντιστοιχεί στην χρονική περίοδο ενός πλαισίου. Αυτή η μέθοδος απαιτεί συγχρονισμό μεταξύ των κόμβων αποστολής για την πρόληψη συγκρούσεων.

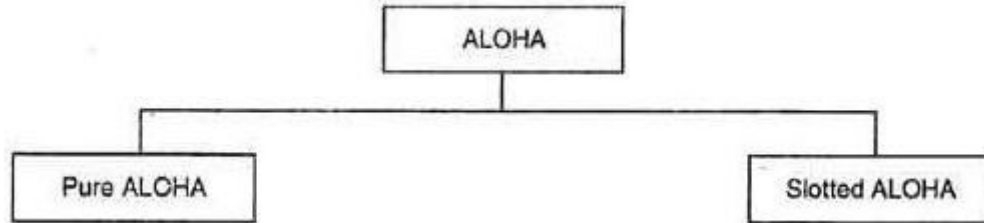
1.1.1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ



Εικόνα 1: Επεξήγηση

(πηγή: <https://ecomputernotes.com/computernetworkingnotes/communication-networks/what-is-aloha>)

1. Ένας σταθμός που έχει έτοιμο FRAME θα το στείλει.
2. Τότε περιμένει για κάποιο χρονικό διάστημα.
3. Εάν λάβει την επιβεβαίωση, τότε η μετάδοση είναι επιτυχής.
4. Διαφορετικά, ο σταθμός χρησιμοποιεί μια στρατηγική backoff και στέλνει ξανά το πακέτο.
5. Μετά από πολλές φορές εάν δεν υπάρχει επιβεβαίωση τότε ο σταθμός διακόπτει την ιδέα της μετάδοσης.

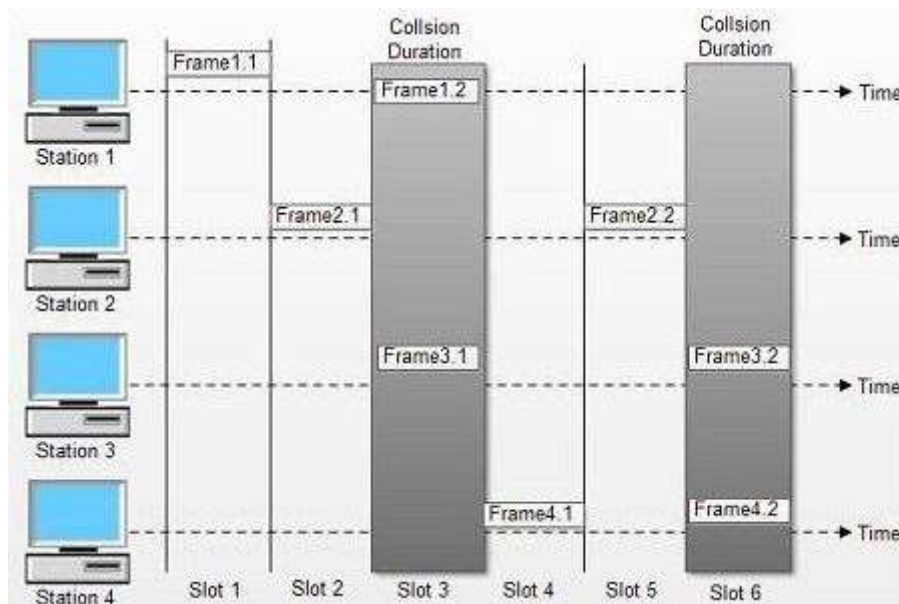


Εικόνα 2: Τύποι του Aloha

(πηγή: <https://ecomputernotes.com/computernetworkingnotes/communication-networks/what-is-aloha>)

1.1.2 Slotted Aloha

Το Slotted Aloha εφευρέθηκε για να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα του pure Aloha καθώς οι πιθανότητες σύγκρουσης στο pure Aloha είναι πολύ υψηλά. Στο σύστημα slotted-ALOHA, ο χρόνος μετάδοσης διαιρείται σε χρονοθυρίδες. Κάθε χρονική θυρίδα γίνεται ακριβώς ίση με το χρόνο μετάδοσης πακέτων. Οι χρήστες συγχρονίζονται με τις χρονοθυρίδες, έτσι ώστε κάθε φορά που ένας χρήστης έχει ένα πακέτο να στείλει, το πακέτο κρατιέται και μεταδίδεται στην επόμενη χρονική θυρίδα. Οι σταθμοί μπορούν να στείλουν ένα πλαίσιο μόνο στην αρχή της υποδοχής και μόνο ένα πλαίσιο αποστέλλεται σε κάθε υποδοχή.



Εικόνα 3: Χρονοθυρίδες στο slotted Aloha.

(πηγή: <https://ecomputernotes.com/computernetworkingnotes/communication-networks/what-is-aloha>)

Τόσο στο Slotted όσο και στο Pure Aloha, η απόφαση ενός κόμβου να εκπέμψει ένα πακέτο λαμβάνεται ανεξάρτητα από τη δραστηριότητα των άλλων κόμβων που βρίσκονται στο ίδιο κανάλι εκπομπής. Κάθε κόμβος που θέλει να εκπέμψει, “ακούει” πρώτα το κανάλι εξετάζοντας αν κάποιος άλλος κόμβος εκπέμπει εκείνη τη στιγμή. Αν

όχι, προχωρά στην εκπομπή του πακέτου αλλιώς περιμένει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα και επαναλαμβάνει την παραπάνω διαδικασία.

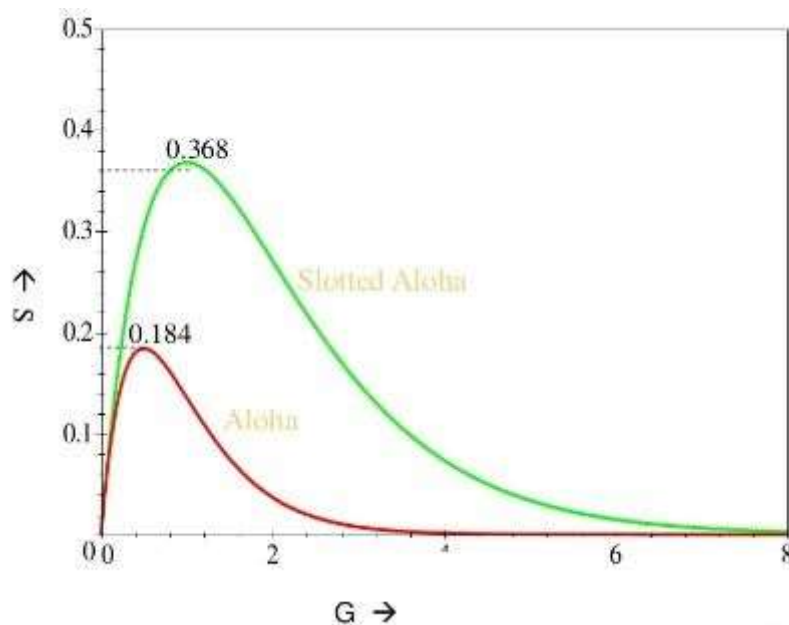
Το πλεονέκτημα της Slotted Aloha εκδοχής, είναι ότι η μέγιστη απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί είναι η διπλάσια από το Pure Aloha. Το μειονέκτημα είναι ότι το Slotted Aloha υλοποιείται πιο δύσκολα επειδή απαιτείται οι κόμβοι να έχουν πρόσβαση σε κοινή χρονική αναφορά, δηλαδή ένα κοινό ρολόι, για προσδιορισμό της αρχής των χρονικών στιγμών.

Η απόδοση S για το Slotted Aloha πρωτόκολλο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$S = Ge^{-G}$$

όπου G : κυκλοφοριακός φόρτος

Η μέγιστη απόδοση του Slotted Aloha προκύπτει όταν $G = 1.0$ που μας κάνει $1/e$ δηλαδή 0.368.



Αυτό σημαίνει ότι στη μέγιστη απόδοση, το 36,8% των χρονοθυρίδων μεταφέρουν επιτυχώς μεταδιδόμενα πακέτα. (Διπλάσια επιτυχία από το Pure Aloha)

Εικόνα 4: Απεικόνιση του throughput

1.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΥΧΑΙΑΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΤΟ LTE (RACH)

1.2.1 Σύντομη περιγραφή

Όταν ενεργοποιείτε το smartphone για πρώτη φορά, θα αρχίσει να αναζητά το δίκτυο. Υπάρχει πιθανότητα να υπάρχουν πολλά δίκτυα ή με άλλα λόγια, υπάρχουν πολλές συχνότητες από διαφορετικούς φορείς που διατίθενται στον αέρα στο οποίο μπορεί να συνδεθεί ο UE (εξοπλισμός χρήστη). Ως εκ τούτου, το UE πρέπει να συγχρονίσει σε κάθε συχνότητα και να ελέγξει αν αυτή είναι η συχνότητα από τον σωστό χειριστή στο οποίο θέλει να συνδεθεί. Το UE το κάνει αυτό με την πολύ αρχική διαδικασία συγχρονισμού. Μόλις το συγχρονισμένο UE διαβάζει το MIB και το SIB ελέγχει αν αυτό είναι το σωστό PLMN. Ας υποθέσουμε ότι διαπιστώνει ότι η τιμή PLMN είναι σωστή έτσι ο UE θα προχωρήσει διαβάζοντας το SIB1 και SIB2. Το επόμενο βήμα

είναι γνωστό ως διαδικασία τυχαίας πρόσβασης στην οποία το δίκτυο για πρώτη φορά ξέρει ότι κάποια UE προσπαθούν να αποκτήσουν πρόσβαση.

Το κανάλι τυχαίας πρόσβασης (RACH) είναι ένα κανάλι ανερχόμενης ζεύξης στο σύστημα κινητής επικοινωνίας που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά πληροφοριών ελέγχου από ένα κινητό τερματικό στο δίκτυο, π.χ. για αρχική πρόσβαση για τη ρύθμιση μιας σύνδεσης ή για ενημερώσεις περιοχής τοποθεσίας. Το κανάλι RACH μπορεί να είναι κανάλι που βασίζεται σε διαμάχη όπου πολλοί χρήστες ενδέχεται να έχουν πρόσβαση στον ίδιο πόρο. Συνήθως δεν υπάρχει γνώση για την απαιτούμενη ισχύ μετάδοσης του κινητού τερματικού και επομένως εφαρμόζεται μια μέθοδος ελέγχου ισχύος ανοιχτού βρόχου.

Οι Εξοπλισμοί Χρήστη (UE) μπορούν να προγραμματιστούν για μετάδοση ανερχόμενης ζεύξης μόνο εάν ο χρονισμός μετάδοσης ανοδικής ζεύξης είναι συγχρονισμένος. Το RACH, επομένως, παίζει βασικό ρόλο ως διεπαφή μεταξύ μη συγχρονισμένων UE και του σχήματος ορθογώνιας μετάδοσης. Στο UMTS, το RACH χρησιμοποιείται κυρίως για αρχικό δίκτυο. Μόλις επιτευχθεί ο συγχρονισμός ανερχόμενης ζεύξης για ένα UE, το eNodeB (απλός σταθμός βάσης) μπορεί να προγραμματίσει πόρους μετάδοσης ορθογώνιων ανερχόμενων ζεύξεων για αυτό.

Το RACH έχει πολύ σημαντική λειτουργικότητα ειδικά στο LTE (και στο WCDMA επίσης). Ο κύριος σκοπός του RACH μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

- Επίτευξη συγχρονισμού ανερχόμενης ζεύξης μεταξύ UE και eNodeB
- Απόκτηση πόρων για το MSG3 (π.χ, RRC Connection Request)

Στο LTE (και στο WCDMA), ο συγχρονισμός σε κατερχόμενη ζεύξη (Πομπός = eNodeB, Δέκτης = UE), επιτυγχάνεται από το ειδικό κανάλι συγχρονισμού (special physical signal pattern). Αυτό το σήμα συγχρονισμού κατερχόμενης ζεύξης μεταδίδεται σε όλους και μεταδίδεται συνεχώς με ένα συγκεκριμένο διάστημα.

Ωστόσο, στην ανερχόμενη ζεύξη (Πομπός = UE, Δέκτης = eNodeB), δεν είναι αποδοτικό (στην πραγματικότητα είναι σπατάλη ενέργειας και προκαλεί πολλές παρεμβολές σε άλλους UE) εάν το UE χρησιμοποιεί αυτό το είδος του μηχανισμού για συγχρονισμό. Στην ανερχόμενη ζεύξη, αυτή η διαδικασία συγχρονισμού θα πρέπει να πληροί τα ακόλουθα κριτήρια

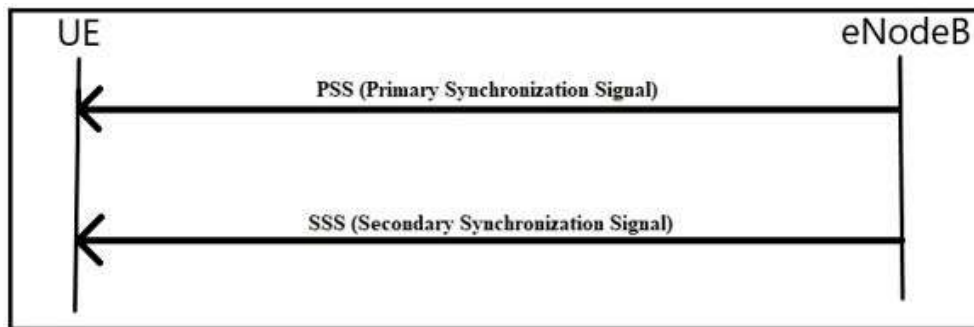
- Η διαδικασία συγχρονισμού πρέπει να γίνεται μόνο όταν υπάρχει άμεση ανάγκη
- Ο συγχρονισμός θα πρέπει να είναι αφιερωμένος μόνο σε ένα συγκεκριμένο UE

Καταστάσεις που απαιτούν την διαδικασία της Τυχαίας Πρόσβασης:

- i) Αρχική πρόσβαση: όταν ο UE προσπαθεί να έχει πρόσβαση στο δίκτυο στην RRC Idle State
- ii) Κατά την διάρκεια εγκαθίδρυσης της RRC Connection
- iii) Handover¹
- iv) Όταν ο συγχρονισμός της ανερχόμενης ζεύξης χαθεί.
- v) Όταν ο UE δεν έχει διαθέσιμους PUCCH πόρους για scheduling request (SR)
- vi) Όταν απαιτείται χρονισμός για την τοποθέτηση του UE

¹ " Handover " είναι η διαδικασία στην οποία το UE αλλάζει το κύτταρο.

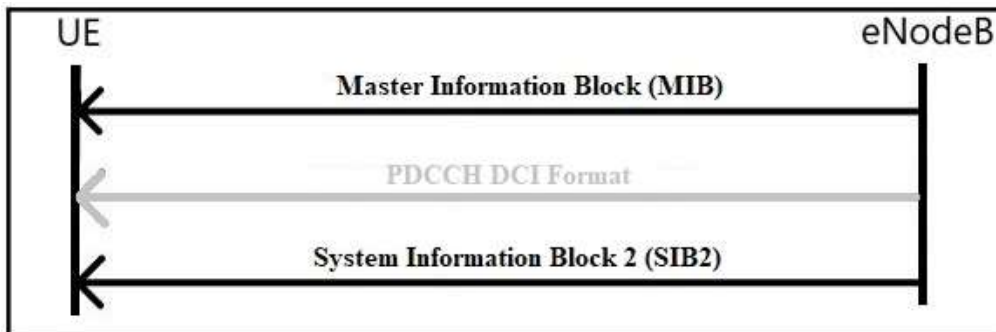
1.2.2 Πριν την διαδικασία της Τυχαίας Πρόσβασης



Εικόνα 5: Pss and Sss

Ο εξοπλισμός χρήστη (UE) συγχρονίζει με το eNodeB με τα PSS (Primary Synchronization Signal) και SSS (Secondary Synchronization Signal).

- Το PSS μεταδίδεται στην αρχή και στη μέση του κάθε καρέ 10 ms.
- Το SSS μεταδίδεται κάθε 5 ms. Το μοτίβο εναλλάσσεται κάθε 5 ms. Ο εξοπλισμός χρήστη (UE) πετυχαίνει συγχρονισμό πλαισίου κατερχόμενης ζεύξης μόλις αποκωδικοποιηθούν και τα δύο μοτίβα SSS.



Εικόνα 6: MIB - SIB

Ο εξοπλισμός χρήστη (UE) κατεβάζει τις πληροφορίες συστήματος

- Ο εξοπλισμός χρήστη (UE) κατεβάζει το MIB (Master Information Block) από το κανάλι κατερχόμενης ζεύξης. Αυτό το κανάλι περιέχει πληροφορίες όπως το εύρος ζώνης (bandwidth) συστήματος, τη διαμόρφωση κεραίας και τον αριθμό πλαισίου του συστήματος.
- Ο εξοπλισμός χρήστη (UE) συντονίζεται στο PDCCH (Physical Downlink Control Channel) για να αναζητήσει πληροφορίες ελέγχου κατερχομένης ζεύξης DCI (Downlink Control Information) και απευθύνεται με το SI-RNTI (System Information – Radio Network Temporary Identifier). Το UL-SCH (Uplink Shared Channel) εκχωρήθηκε από το PDCCH και περιέχει πληροφορίες του συστήματος SIB(System Information Block).
- Ο εξοπλισμός χρήστη (UE) πραγματοποιεί λήψη του SIB από το DL-SCH. Το SIB2 περιέχει τις παραμέτρους που απαιτούνται για την αρχική πρόσβαση.

Οι πληροφορίες που περιέχει το SIB2:

- SI-RNTI,
- Root sequence index for Zadoff Chu codes,
- Zero correlation zone config,

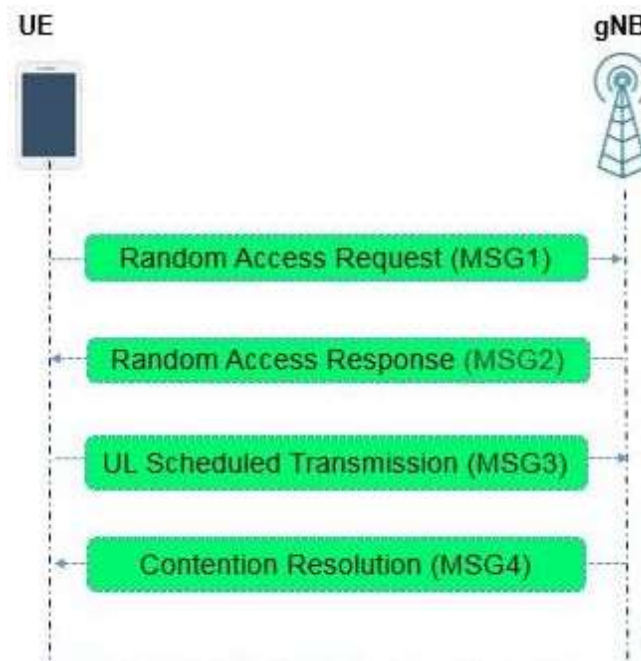
- prach frequency,
- prach frequency offset

Σε αυτό το στάδιο, ο εξοπλισμός χρήστη (UE) δεν διαθέτει πόρους ή διαθέσιμο κανάλι για να ενημερώσει το δίκτυο σχετικά με την επιθυμία του να συνδεθεί, ώστε να στείλει το αίτημά του πάνω από το κοινόχρηστο μέσο. Τώρα υπάρχουν δύο δυνατότητες σε αυτό το στάδιο:

1. Είτε υπάρχουν πολλά άλλα UEs στην ίδια περιοχή (στο ίδιο κύτταρο) στέλνοντας το ίδιο αίτημα στο οποίο υπάρχει επίσης μια πιθανότητα σύγκρουσης μεταξύ των αιτημάτων που προέρχονται από διάφορες άλλες UEs. Μια τέτοια διαδικασία τυχαίας πρόσβασης ονομάζεται διαδικασία τυχαίας προσποίησης που βασίζεται στην τυχαία πρόσβαση (Contention-based Random Access (CBRA)).
2. Στο δεύτερο σενάριο, το δίκτυο μπορεί να ενημερώσει το UE να χρησιμοποιήσει κάποια μοναδική ταυτότητα για να αποφευχθεί η αίτησή του να συγκρούσει με αιτήματα που προέρχονται από άλλες UEs. Το δεύτερο σενάριο ονομάζεται ελεύθερη διαμάχη ή μη διαμάχη τυχαίας διαδικασίας πρόσβασης (Contention-Free Random Access (CFRA) or non contention based random access).

1.2.3 Contention-based Random Access (CBRA)

Στη Contention-based Random Access, ο UE επιλέγει ένα τυχαίο preamble από μια λίστα τέτοιων preambles που μοιράζονται με άλλα UE. Αυτό σημαίνει ότι ο UE έχει πιθανούς κινδύνους επιλογής του ίδιου preamble με ένα άλλο UE και με αποτέλεσμα να αντιμετωπίσει σύγκρουση ή διαμάχη. Το eNodeB χρησιμοποιεί έναν μηχανισμό επίλυσης διαφορών για να χειριστεί αυτά τα αιτήματα πρόσβασης τέτοιου τύπου. Σε αυτή τη διαδικασία, το αποτέλεσμα είναι τυχαίο και δεν επιτυγχάνουν όλα τα αιτήματα τυχαίας πρόσβαση. Η CBRA είναι γνωστή και ως τεσσάρων βημάτων Rach διαδικασία.



Εικόνα 7: CBRA

(πηγή: <https://www.techplayon.com/5g-nr-rach-procedure-overview-cbra-cfra/>)

Ξεκινώντας από τον εξοπλισμό χρήστη (UE) μόλις λάβει τα PSS SSS MIB SIB διαβάζει το SI-RNTI και ξεκινάει την διαδικασία της τυχαίας πρόσβασης

MSG1: Ο UE επιλέγει τυχαία ένα preamble από το σύνολο των 64 διαθέσιμων preambles που διατίθενται στο κύτταρο. Ο UE πρέπει επίσης να δώσει τη δική του ταυτότητα στο δίκτυο, ώστε το δίκτυο να μπορέσει να επικοινωνήσει μαζί του στο επόμενο βήμα. Η ταυτότητα που θα χρησιμοποιήσει το UE ονομάζεται RA-RNTI (Random Access Radio Network Temporary Identity). Η επιλογή του preamble είναι μια κυκλική μετατόπιση στο Zadoff-chu κώδικα στο κύτταρο. Ο UE μεταδίδει το preamble στο κανάλι RA. Βασικά, αυτή η μετάδοση δεν φέρει κανένα κομμάτι δεδομένων. Το RA-RNTI καθορίζεται σιωπηρά από το χρονοδιάγραμμα της μετάδοσης του preamble. Εάν ο UE δεν λάβει καμία απάντηση από το δίκτυο, αυξάνει την ισχύ του σε σταθερό βήμα και στέλνει ξανά το preamble.

MSG2: Το eNodeB ανιχνεύει τη μετάδοση του preamble. Το eNodeB στέλνει "Random Access Response" στο UE στο DL-SCH (Downlink Shared Channel) που απευθύνεται στο RA-RNTI (RA_RNTI is decided by the sending timing (SubFrame) of PRACH Preamble by UE) που υπολογίζεται από το χρονοδιάγραμμα της μετάδοσης του preamble.

Το μήνυμα φέρει τις ακόλουθες πληροφορίες Temporary C-RNTI:

- Το ENodeB δίνει μια άλλη ταυτότητα στο UE που ονομάζεται (προσωρινή ταυτότητα του δικτύου κυψελών) TC-RNTI (Temporary Cell Radio Network Temporary Identity) για περαιτέρω επικοινωνία.
- Timing Advance Value: Ο eNodeB ενημερώνει επίσης το UE να αλλάξει το χρονοδιάγραμμά του, ώστε να μπορεί να αντισταθμίσει την καθυστέρηση του γύρου που προκαλείται από την απόσταση UE από το eNodeB.
- Uplink Resource Grant: Ο eNodeB δίνει πόρους στον UE, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιήσει το UL-SCH (Uplink Shared Channel)

MSG3: Χρησιμοποιώντας ο UE το UL-SCH (Uplink Shared Channel) στέλνει το μήνυμα αίτησης σύνδεσης (RRC connection request message) στον eNodeB. Το UE αναγνωρίζεται από την προσωρινή C-RNTI (που έχει εκχωρηθεί στο προηγούμενο βήμα από eNodeB). Το μήνυμα περιέχει παρακάτω:

- Την ταυτότητά του UE (TMSI ή τυχαία τιμή)
 - Το TMSI χρησιμοποιείται εάν ο UE έχει προηγουμένως συνδεθεί με το ίδιο δίκτυο. Με την τιμή TMSI, το UE αναγνωρίζεται στο βασικό δίκτυο.
 - Η τυχαία τιμή χρησιμοποιείται εάν ο UE συνδέεται για την πρώτη φορά στο δίκτυο.²

² Γιατί χρειαζόμαστε τυχαία τιμή ή TMSI; Επειδή υπάρχει πιθανότητα ότι η TC-RNTI έχει ανατεθεί σε περισσότερα από ένα UEs σε προηγούμενο βήμα, λόγω πολλαπλών αιτημάτων που έρχονται ταυτόχρονα. (σενάριο σύγκρουσης)

- Δημιουργία σύνδεσης: Ο λόγος για τον οποίο χρειάζεται ο UE να συνδεθεί με το δίκτυο.
- Ο UE ξεκινάει το T300 χρονόμετρο περιμένοντας το RRC Connection Setup

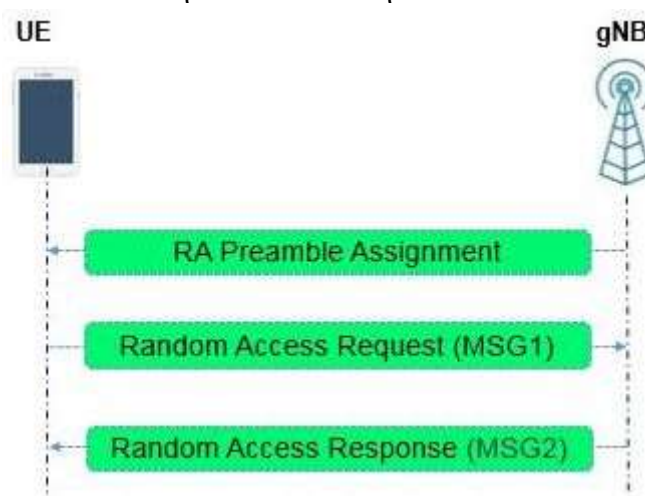
MSG4: Το eNodeB αποδέχεται την σύνδεση με τον UE και χρησιμοποιώντας το DL-SCH στέλνει RRC Connection Setup. Αυτό το μήνυμα περιέχει την τυχαία τιμή ή την τιμή TMSI και μεταφέρει το C-RNTI για την περαιτέρω επικοινωνία μεταξύ τους.

Στην συνέχεια ο UE στέλνει RRC Connection Setup Complete και έτσι επιτυγχάνεται η περαιτέρω επικοινωνία.

1.2.4 Non Contention or Contention Free Random Access (CFRA)

Στη Contention Free Random Access, το eNodeB εκχωρεί ξεχωριστό preamble σε κάθε UE. Το ξεχωριστό preamble παρέχεται στον UE είτε μέσω σηματοδότησης RRC (κατανοώντας ότι το preamble μπορεί να προσδιοριστεί εντός μηνύματος RRC) ή της σηματοδότησης Physical Layer (DCI στο PDCCH). Επομένως, δεν υπάρχει σύγκρουση μεταξύ preambles. Όταν οι αποκλειστικοί πόροι είναι ανεπαρκείς, το eNodeB δίνει εντολή στους UEs να ξεκινήσουν το RA. Η CFRA είναι γνωστή και ως τριών βημάτων Rach διαδικασία.

Αυτή η διαδικασία ξεκινά πάντοτε από το δίκτυο σε περίπτωση " Handover ". Επομένως, " Handover " είναι η διαδικασία στην οποία το UE αλλάζει το κύτταρο.



Εικόνα 8: CFRA

(πηγή: <https://www.techplayon.com/5g-nr-rach-procedure-overview-cbra-cfra/>)

Random Access Slot

Το κανάλι τυχαίας πρόσβασης διαιρείται σε RA Slots

1.2.5 Physical Random Access Channel (PRACH)

Στο LTE υπάρχουν 64 PRACH preambles διαθέσιμα για κάθε κύτταρο. Τα 64 preambles δημιουργούνται από κυκλικές μετατοπίσεις των αλληλουχιών Zadoff-chu. Οι αλληλουχίες Zadoff-chu έχουν πολλές ιδιότητες, αλλά υπάρχει μια που είναι πάνω απ' όλα: αν η μετατόπιση του κύκλου (NCS) που χρησιμοποιείται είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα του μέγιστου χρόνου διάδοσης στο κύτταρο και του μέγιστου χρόνου εξάπλωσης του καναλιού, τότε η διασταυρούμενη συσχέτιση μεταξύ διαφορετικών preambles που βασίζονται σε κυκλικές μετατοπίσεις της ίδιας ακολουθίας Zadoff-chu είναι μηδέν στο δέκτη. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει παρεμβολή εσωτερικά του κυττάρου από πολλές προσπάθειες τυχαίων πρόσβασης χρησιμοποιώντας preambles που προέρχονται από την ίδια ακολουθία Zadoff-chu.

Έτσι, εάν τα preambles από διαφορετικές ακολουθίες Zadoff-chu δεν είναι ορθογώνια και τα preambles από την κυκλική μετατόπιση της ίδιας ακολουθίας Zadoff-chu είναι ορθογώνια, τότε θα πρέπει να ευνοηθεί η κυκλική μετατόπιση μιας Zadoff-chu ακολουθίας. Αλλά, αυτό δεν είναι δυνατόν όλες τις ώρες. Για να το εξηγήσετε αυτό, επιτρέψτε μου να απευθυνθώ στον ακόλουθο πίνακα:

NCs Configuration (PrachCs)	Number of Cyclic Shifts Samples (Ncs)	Number of cyclic shifts per ZC Sequence	Number of ZC Root Sequences per cell	Cell Radius (Range - km)	
1	13	64	1	0.76	Format 0 Format 2
2	15	55	2	1.04	
3	18	46	2	1.47	
4	22	38	2	2.04	
5	26	32	2	2.62	
6	32	26	3	3.48	
7	38	22	3	4.33	
8	46	18	4	5.48	
9	59	14	5	7.34	
10	76	11	6	9.77	
11	93	9	8	12.20	
12	119	7	10	15.92	
13	167	5	13	22.78	Format 1 Format 3
14	279	3	22	38.80	
15	419	2	32	68.83	
0	839	1	64	118.90	

Εικόνα 9: Διαστασιολόγηση κυκλικών μετατοπίσεων
(πηγή: <https://telecommunications4dummies.com/2021/03/01/prach/>)

Το μήκος της ακολουθίας Zadoff-chu είναι 839 δείγματα. Κάθε τιμή του PrachCS ορίζει τον αριθμό των κυκλικών μετατοπίσεων που έχει η ακολουθία (1^η στήλη). Για την τιμή 1 του PrachCS υπάρχουν 13 δείγματα κυκλικής μετατόπισης. Τώρα από 1 ακολουθία Zadoff-chu από τις 839 μπορούμε να πάρουμε $839/13 = 64$ κυκλικές μετατοπίσεις ανά ακολουθία Zadoff-chu. Αυτό σημαίνει ότι από μια ενιαία ακολουθία Zadoff-chu μπορούμε να πάρουμε τις 64 preambles.

Φανταστείτε τι συνέβη όταν η τιμή του PrachCS είναι 12, τότε έχουμε 119 δείγματα κυκλικής μετατόπισης έτσι, από 1 ακολουθία Zadoff-chu από τις 839 μπορούμε να πάρουμε $839/119 = 7$ κυκλικές μετατοπίσεις ανά ακολουθία Zadoff-chu.

Για να πάρετε τα 64 preambles, απαιτούνται περισσότερες ακολουθίες Zadoff-chu (συνολικά 10). Καθώς μπορείτε να δείτε τον συνολικό αριθμό των ακολουθιών είναι

64, αλλά προκύπτει από διαφορετικούς συνδυασμούς του αριθμού των ακολουθιών και των κυκλικών μετατοπίσεων.

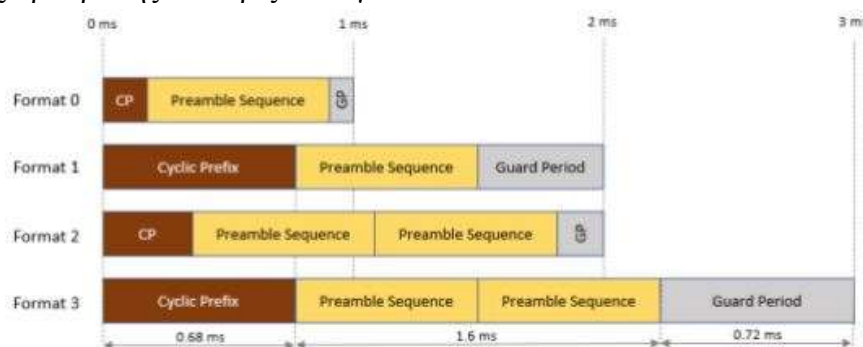
Υπάρχουν 838 ακολουθίες Zadoff-chu διαθέσιμες για preambles. Η παράμετρος rootSequenceIndex λέει στο UE ποια ακολουθία πρέπει να χρησιμοποιήσει.

Logical root sequence number	Physical root sequence index (in increasing order of the corresponding logical sequence number)
0-23	129, 710, 140, 699, 120, 719, 210, 629, 168, 671, 84, 755, 105, 734, 93, 746, 70, 769, 60, 779, 2, 837, 1, 838
24-29	56, 783, 112, 727, 148, 691
30-35	80, 759, 42, 797, 40, 799
36-41	35, 804, 73, 766, 146, 693
42-51	31, 808, 28, 811, 30, 809, 27, 812, 29, 810
52-63	24, 815, 48, 791, 68, 771, 74, 765, 178, 661, 136, 703
...
64-75	86, 753, 78, 761, 43, 796, 39, 800, 20, 819, 21, 818
810-815	309, 530, 265, 574, 233, 606
816-819	367, 472, 296, 543
820-837	336, 503, 305, 534, 373, 466, 280, 559, 279, 560, 419,

Εικόνα 10: Αντιστοίχιση ακολουθιών σύμφωνα με την παράμετρο rootSequenceIndex (πηγή: <https://telecommunications4dummies.com/2021/03/01/prach/>)

Στον εξοπλισμό χρήστη UE χορηγείται ένας δείκτης (the logical root sequence number) ο οποίος καθορίζει τη θέση του Physical root sequence index που αντιστοιχίζεται στον παραπάνω πίνακα. Για παράδειγμα, ένας logical root sequence number 27 υποδεικνύει έναν physical root sequence index 727. Τον βρίσκουμε εξετάζοντας το εύρος του logical root sequence number (στην περίπτωση αυτή 24-29) που βρίσκεται 3 θέσεις άνω της τιμής 24, έτσι αντίστοιχα ο Physical root sequence index θα βρίσκεται 3 θέσεις άνω τις τιμής 56 (που αντιστοιχίζεται το 24).

Η τιμή του PrachCS εξαρτάται από το μέγεθος του κυττάρου. Εάν το κύτταρο έχει κάλυψη 2 χλμ. τότε το PrachCS θα πρέπει να είναι 4 (Εικόνα 9). Αλλά η απόσταση του κυττάρου διαμορφώνει επίσης τη μορφή του preamble. Υπάρχουν 4 μορφές preambles τυχαίας πρόσβασης που ορίζονται για το FDD:



Εικόνα 11: 3GPP (TS36.211) FDD Random Access Formats (πηγή: <https://telecommunications4dummies.com/2021/03/01/prach/>)

Preamble Format	T_CP (in Ts)	T_CP (in ms)	T_SEQ (in Ts)	T_SEQ (in ms)	Total Length (in ms)	Number of Subframes	Guard Time (in ms)	Cell Radius
0	3168	0.103	24576	0.800	0.903	1	0.097	~ 14 km
1	21024	0.684	24576	0.800	1.484	2	0.516	~ 75 km
2	6240	0.203	2 x 24576	1.600	1.803	2	0.197	~ 28 km
3	21024	0.684	2 x 24576	1.600	2.284	3	0.716	~ 108 km
4	448	0.015	4096	0.133	0.148			

Εικόνα 12: Preambles Format (πηγή: <https://www.telecomhall.net/t/how-cell-size-is-determined-from-length-of-preamble-format/13048>)

1.3 NB-IoT RACH Procedure

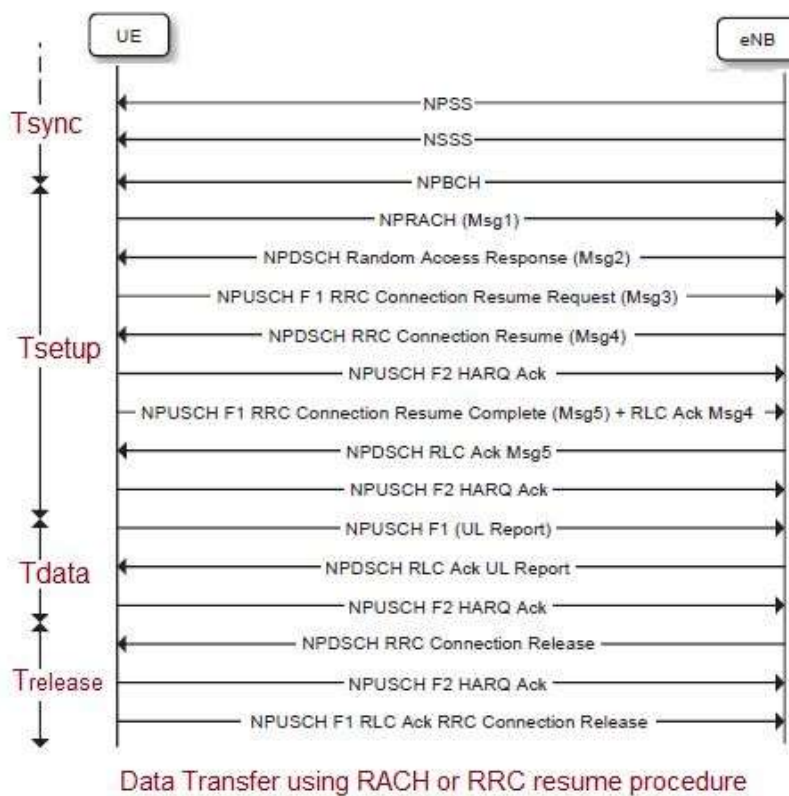
Η διαδικασία τυχαίας πρόσβασης σε συσκευή NB-IoT είναι μια κατάσταση χαμηλής ισχύος, όπου μπορεί να εξοικονομήσει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας μπαίνοντας σε κατάσταση αδράνειας. Η διαδικασία τυχαίας πρόσβασης σε συσκευή NB-IoT βασίζεται στο IEEE 802.11ah πρότυπο.

NB-IoT δίκτυα σχεδιάζονται για να διαχειρίζονται IoT συσκευές που έχουν χαμηλές απαιτήσεις εύρους ζώνης και μπορούν να ανεχθούν υψηλή καθυστέρηση.

Η διαδικασία τυχαίας πρόσβασης σε συσκευή NB-IoT είναι ίδια με τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης LTE.

Ακολουθούν οι φάσεις στις οποίες κατηγοριοποιούνται τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ UE και eNB.

- Φάση συγχρονισμού (**Tsync**)
- Φάση ρύθμισης σύνδεσης ή διαδικασία τυχαίας πρόσβασης (**Tsetup**)
- Φάση μεταφοράς δεδομένων (**Tdata**)
- Φάση αποσύνδεσης (**Trelease**)



Εικόνα 13: Ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ UE και eNB

(πηγή: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/LTE-NB-IoT-RACH-Procedure.html>)

1.3.1 Φάση συγχρονισμού (Tsync)

Ο UE λαμβάνει σήματα NPSS και NSSS από το eNB στην κατερχόμενη ζεύξη και συγχρονίζεται με το eNB.

Τα σήματα συγχρονισμού NB-IoT χρησιμοποιούνται για συγχρονισμό μεταξύ καταναμημένων συστημάτων. Επίσης περιγράφονται ως ακολουθίες από bits οι οποίες μεταδίδονται σε μονάδες πλαισίου για να επιτύχουν τον συγχρονισμό των πακέτων

δεδομένων. Τα σήματα μεταδίδονται με CSMA/CA (carrier sense multiple access collision avoidance) ή TPC (token passing access method). Τα σήματα συγχρονισμού NB-IoT αποστέλλονται μέσω χρονοθυρίδων για να αποφευχθεί οποιαδήποτε παρεμβολή.

NPSS:

Narrowband Primary Synchronization Signal (NPSS) μεταδίδεται συνεχώς στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο ισχύος. Το NPSS παρέχει συγχρονισμό χρόνου και συχνότητας στην μετάδοση σήματος σε ένα κυψελοειδές δίκτυο. Το NPSS είναι το σήμα που μεταδίδεται από το σταθμό βάσης(eNB) στο τερματικό(UE).

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συγχρονισμό του χρόνου μεταξύ πομπού και δέκτη, καθώς και για συγχρονισμό των επιπέδων διαμόρφωσης δύο σημάτων.

NSSS:

Narrowband Secondary Synchronization Signal (NSSS) παρέχει συγχρονισμό χρόνου και συχνότητας του UE σε ένα κυψελοειδές δίκτυο. Το NSSS είναι το σήμα που μεταδίδεται από το σταθμό βάσης(eNB) στο τερματικό(UE).

NPBCH:

NB-IoT Physical Broadcast Channel (NPBCH) χρησιμοποιείται για την μεταφορά του MIB από το eNB στον UE.

1.3.2 Φάση ρύθμισης σύνδεσης (Tsetup)

msg1: Αφού ο συγχρονισμός και η επιβεβαίωση της πρόσβασης δεν αποκλειστεί, ο UE στέλνει το **preamble** χρησιμοποιώντας το κανάλι NPRACH.

Ο UE χρησιμοποιεί την κατάλληλη διαμόρφωση NPRACH σύμφωνα με την εκτίμηση κλάσης κάλυψης

msg2: Αφού το eNB εντοπίσει το **preamble** του NPRACH, στέλνει πίσω το RAR (δηλαδή την απόκριση τυχαίας πρόσβασης) που ορίζεται ως msg2.

msg3: Το RAR περιέχει παραμέτρους TA (προώθηση χρονισμού) καθώς και πληροφορίες προγραμματισμού που θα χρησιμοποιηθούν από τον UE για τη μετάδοση του (δηλ. Αίτημα Συνέχισης Συνδέσεων).

msg4: (Συνέχιση σύνδεσης RRC), το δίκτυο επιλύει τυχόν διαφωνίες λόγω πολλαπλών UE που μεταδίδουν το ίδιο **preamble** και μεταδίδει μήνυμα ρύθμισης σύνδεσης ή συνέχισης.

Το UE απαντά με ρύθμιση ή συνέχιση σύνδεσης RRC, πλήρες μήνυμα προκειμένου να ολοκληρωθεί η μετάβαση στη "Συνδεδεμένη κατάσταση".

msg5: Από τον UE θέτει το RRC link γνωστό ως NAS service request (Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται για τη διαχείριση της δημιουργίας περιόδων επικοινωνίας και για τη διατήρηση συνεχών επικοινωνιών με τον εξοπλισμό χρήστη καθώς κινείται.)

Στην συνέχεια ακολουθεί στο UL το report.

1.3.3 Φάση μεταφοράς δεδομένων (Tdata)

Αφού δημιουργηθεί η σύνδεση, η μεταφορά δεδομένων μεταξύ UE και eNB πραγματοποιείται όπως φαίνεται στο διάγραμμα από διάφορα μηνύματα ακολουθώντας πάντα το HARQ Ack

1.3.4 Φάση αποσύνδεσης (Trelease)

Μόλις ολοκληρωθεί η μεταφορά δεδομένων, η σύνδεση μπορεί να αποδεσμευτεί από το eNB όπως φαίνεται.

Κεφάλαιο 2

2.1 NB-IoT μη συγχρονισμένη RACH Procedure

(3GPP TS 36.213 υποπαράγραφος 6.1) Η L1 διαδικασία τυχαίας πρόσβασης περιλαμβάνει τη μετάδοση του **preamble** (και στη συνέχεια την απόκριση τυχαίας πρόσβασης-RAR), ενώ τα υπόλοιπα μηνύματα προγραμματίζονται για μετάδοση από ανώτερο επίπεδο στο κοινόχρηστο κανάλι δεδομένων (PUSCH) και δεν θεωρούνται μέρος της τυχαίας πρόσβασης L1. Η διαδικασία L1 ενεργοποιείται κατόπιν αιτήματος μιας μετάδοσης **preamble** από ανώτερα επίπεδα συσκευών NB-IoT. Ένας ευρετήριο από **preambles**, ένα προοίμιο στόχου που έλαβε ισχύς (PREAMBLE_RECEIVED_TARGET_POWER), ένα αντίστοιχο RA-RNTI και ένας πόρος PRACH υποδεικνύονται από υψηλότερα επίπεδα, ως μέρος του αιτήματος. Για μειωμένο εύρος ζώνης - Χαμηλή πολυπλοκότητα (BL)/Βελτίωση κάλυψης (CE) (BL/CE) - UE, ένας αριθμός επαναλήψεων PRACH για προσπάθεια μετάδοσης **preamble** υποδεικνύεται επίσης από υψηλότερα επίπεδα ως μέρος του αιτήματος. Για αυτό το BL/CE UE με το επίπεδο βελτίωσης κάλυψης PRACH 0/1/2, ένα **preamble** ισχύος μετάδοσης PPRACH προσδιορίζεται ως:

$$\text{PPRACH} = \min\{ \text{PCMAX}_{c(i)}, \text{PREAMBLE_RECEIVED_TARGET_POWER} + \text{PLc} \} \text{ [dBm]}$$

Όπου $\text{PCMAX}_{c(i)}$ είναι η διαμορφωμένη ισχύς εκπομπής UE για το υποπλαίσιο i του κελιού εξυπηρέτησης c όπως ορίζεται 3GPP TS 36.101 "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception"

Για το (BL/CE) UE, PPRACH είναι το $\text{PCMAX}_{c(i)}$ για το υψηλότερο PRACH βελτίωση κάλυψης επιπέδου 3.

Όπου PLc (path loss \rightarrow downlink) είναι η εκτίμηση της απώλειας διαδρομής κατερχόμενης ζεύξης που υπολογίζεται στο UE για την εξυπηρέτηση του κελιού c .

Ένα **preamble** επιλέγεται από τη σειρά **preamble** χρησιμοποιώντας το ευρετήριο **preamble**. Για ένα BL/CE UE, το μοναδικό **preamble** μεταδίδεται για τον αριθμό των PRACH επαναλήψεων για το σχετικό επίπεδο βελτίωσης κάλυψης PRACH, όπως υποδεικνύεται από υψηλότερα επίπεδα (SIB).

2.2 NB-IoT RACH Related Parameters

Επιπλέον, σύμφωνα με 3GPP TS 36.321 προτού μπορέσει να ξεκινήσει η διαδικασία, οι ακόλουθες πληροφορίες για το σχετικό κύτταρο εξυπηρέτησης θεωρείται ότι είναι διαθέσιμες για NB-IoT ή UEs σε βελτιωμένη κάλυψη (ανατρέξτε σε 3GPP TS 36.331 "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification"):

- Εάν το UE είναι ένα NB-IoT UE ή ένα UE σε βελτιωμένη κάλυψη, τότε το διαθέσιμο σύνολο πόρων PRACH που σχετίζεται με κάθε βελτιωμένο επίπεδο κάλυψης που υποστηρίζεται στο κελί εξυπηρέτησης για τη μετάδοση του Προοιμίου τυχαίας πρόσβασης, είναι το **prach-ConfigIndex**.

- η αντιστοίχιση των πόρων PRACH σε βελτιωμένα επίπεδα κάλυψης καθορίζεται σύμφωνα με τα ακόλουθα:

- ο αριθμός των βελτιωμένων επιπέδων κάλυψης είναι ίσος με ένα συν τον αριθμό των ορίων RSRP που υπάρχουν στο **rsrp-ThresholdsPrachInfoList**.
- Κάθε επίπεδο βελτιωμένης κάλυψης έχει έναν anchor carrier PRACH πόρο που υπάρχει στο **nprach-ParametersList** και μηδέν ή έναν PRACH πόρο για κάθε non-anchor carrier που σηματοδοτείται στο **ul-ConfigList**.

(anchor carrier = resource block RB που διατίθενται ως ο κύριος ράδιο-πόρος με τα απαραίτητα σήματα σηματοδότησης (broadcast signals i.e. PBCCH) για μια NB-IoT σύνδεση κυψέλης)

- Τα βελτιωμένα επίπεδα κάλυψης αριθμούνται από το 0 και η αντιστοίχιση των πόρων PRACH σε βελτιωμένα επίπεδα κάλυψης γίνεται με αυξανόμενη σειρά **numRepetitionsPerPreambleAttempt**.

- ένας πόρος PRACH αντιστοιχίζεται σε ένα βελτιωμένο επίπεδο κάλυψης.

- κάθε πόρος PRACH περιέχει ένα σύνολο subcarriers **nprach-NumSubcarriers**

- ο μέγιστος αριθμός προσπαθειών μετάδοσης **preamble** ανά βελτιωμένο επίπεδο κάλυψης που υποστηρίζεται στο κελί εξυπηρέτησης **maxNumPreambleAttemptCE**.

- ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτούνται για τη μετάδοση του **preamble** ανά προσπάθεια για κάθε βελτιωμένο επίπεδο κάλυψης που υποστηρίζεται στο κελί εξυπηρέτησης **numRepetitionPerPreambleAttempt**.

- όταν πολλοί πάροχοι παρέχουν πόρους PRACH για το ίδιο βελτιωμένο επίπεδο κάλυψης, ο UE θα επιλέξει τυχαία έναν από αυτούς χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες πιθανότητες επιλογής:

- η πιθανότητα επιλογής του anchor carrier PRACH πόρου για το δεδομένο επίπεδο βελτιωμένης κάλυψης, **nprach-ProbabilityAnchor**, δίνεται από την αντίστοιχη καταχώρηση στο **nprach-ProbabilityAnchorList**.
- η πιθανότητα επιλογής είναι ίση για όλους τους non-anchor carrier PRACH πόρους και η πιθανότητα επιλογής ενός non-anchor carrier PRACH πόρο είναι:

$$(1 - \text{nprach-ProbabilityAnchor}) / (\text{number of non-anchor NPRACH resources})$$

- η διαμορφωμένη μεταδιδόμενη ισχύς UE (3GPP TS 36.101) της κυψέλης εξυπηρέτησης που εκτελεί τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης, **PCMAX, c**

- το μέγεθος του παραθύρου απόκρισης RA **ra-ResponseWindowSize** και το Contention Resolution Timer **mac-ContentionResolutionTimer** (μόνο για SpCell) ανά βελτιωμένο επίπεδο κάλυψης που υποστηρίζεται στο κελί εξυπηρέτησης.

- Ο συντελεστής power-ramping **powerRampingStep** και προαιρετικά **powerRampingStepCE1**.

- Ο μέγιστος αριθμός μετάδοσης preamble **preambleTransMax-CE**.

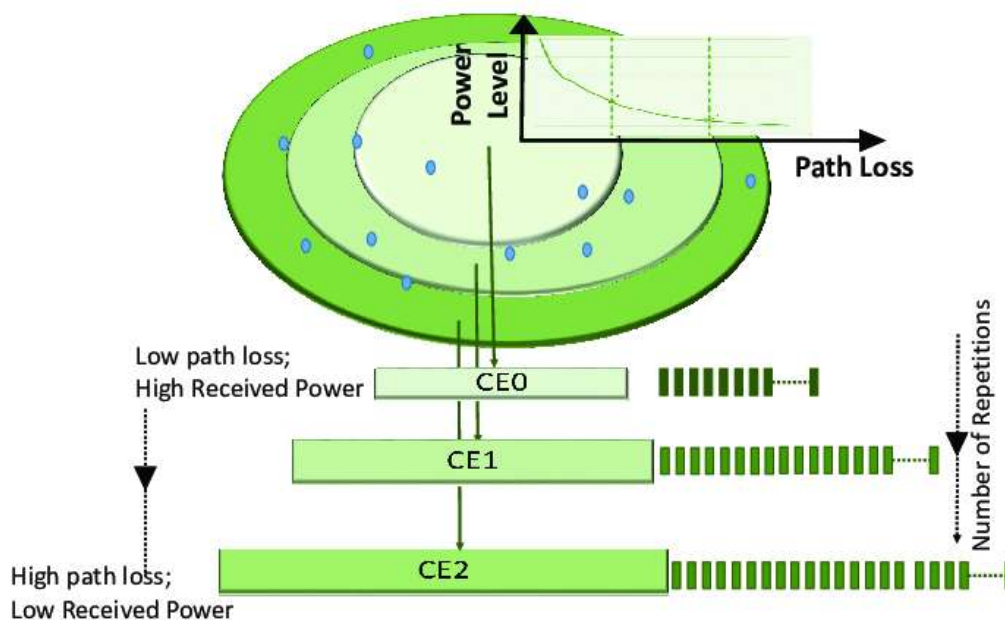
- Η αρχική ισχύς preamble **preambleInitialReceivedTargetPower** και προαιρετικά **preambleInitialReceivedTargetPowerCE1**.

- Η μορφή του preamble βασίζεται **offset DELTA_PREAMBLE = 0** (3GPP TS 36.321 υποπαράγραφος 7.6) για NB-IoT.

2.3 NB-IoT RACH Operator configuration

Ο χειριστής μπορεί να διαμορφώσει έως και τρία επίπεδα βελτίωσης κάλυψης (CE) (CE0, CE1, CE2) για την εξυπηρέτηση Εξοπλισμών Χρήστη (UEs), με βάση τα επίπεδα λήψης RSRP. Ο κύριος αντίκτυπος των διαφορετικών επιπέδων CE είναι ότι το μήνυμα RACH πρόκειται να επαναληφθεί διαφορετικές φορές σε διαφορετικά CE, με βάση το επίπεδο RSRP (ή το επακόλουθο pathloss):

Όταν η απώλεια διαδρομής (pathloss) στην επιθυμητή κάλυψη είναι υψηλή, μπορεί να διαμορφωθεί μεγαλύτερος αριθμός επαναλήψεων. Το δίκτυο μπορεί να διαμορφώσει έως και τρία επίπεδα ενίσχυσης κάλυψης (CE) (CE0, CE1, CE2) για την εξυπηρέτηση Εξοπλισμών Χρηστών (UEs) με διαφορετικές απώλειες διαδρομής όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω. Ο κύριος αντίκτυπος των διαφορετικών επιπέδων CE είναι ότι το μήνυμα πρόκειται να επαναληφθεί διαφορετικές φορές. Εάν η συσκευή βρίσκεται σε επίπεδο CE με χαμηλότερη απώλεια διαδρομής (επίπεδο CE0 στην εικόνα 14) μετά ο αριθμός των φορών που χρειάζεται να επαναληφθεί το σήμα είναι μικρότερος. Ωστόσο, ο αριθμός των διαμορφωμένων επαναλήψεων είναι υψηλότερος για τη συσκευή σε επίπεδο CE που εμφανίζει υψηλή απώλεια διαδρομής (επίπεδο CE2 στην εικόνα 14).



Εικόνα 14: Επίπεδα βελτίωσης κάλυψης και επαναλήψεις

(πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Coverage-enhancement-levels-and-repetitions_fig1_337238909)

- Όφελος: διασφαλίζει ότι λαμβάνεται καλή ποιότητα σήματος σε όλα τα διαμορφωμένα επίπεδα CE.
- Μειονέκτημα: Πρέπει να πραγματοποιηθεί βελτιστοποίηση για την σωστή επιλογή των παραμέτρων RACH ανά CE.
 - Η επαναλαμβανόμενη μετάδοση καταλαμβάνει περισσότερα στοιχεία πόρων που οδηγούν σε απώλεια φασματικών πόρων.

Η διαδικασία τυχαίας πρόσβασης ξεκινά από μια συσκευή NB-IoT και εάν αποτύχει, τότε η συσκευή μπορεί να δοκιμάσει ξανά το RACH στο ίδιο επίπεδο CE ακολουθώντας την προαναφερθείσα παράμετρο 3GPP «**maxNumPreambleAttemptCE**».

Μετά τον διαμορφωμένο αριθμό επαναληπτικών προσπαθειών στο αρχικά επιλεγμένο επίπεδο CE, οι επαναλήψεις RAP εκτελούνται στα υψηλότερα επίπεδα CE.

Θυμηθείτε ότι power ramping μπορεί να πραγματοποιηθεί σε επαναληπτικές προσπάθειες RACH. (Η 3GPP ορίζει παραμέτρους ("powerRampingStep" και προαιρετικά "powerRampingStepCE1"))

Μετά το 3GPP, η σειρά επιλογής επιπέδου NB-IoT CE ακολουθεί:

- εάν το RSRP threshold του CE2 (επίπεδο βελτιωμένης κάλυψης 2) έχει διαμορφωθεί από ανώτερα στρώματα στο rsrp-ThresholdsPrachInfoList και το μετρήσιμο RSRP < RSRP threshold του CE3 (επίπεδο βελτιωμένης κάλυψης 3) και το UE είναι ικανό για βελτιωμένο επίπεδο κάλυψης 2, τότε:
 - η MAC θεωρεί ότι βρίσκεται στο CE2 (επίπεδο βελτιωμένης κάλυψης 2).
- εάν το RSRP threshold του CE1 (επίπεδο βελτιωμένης κάλυψης 1) έχει διαμορφωθεί από ανώτερα στρώματα στο rsrp-ThresholdsPrachInfoList και το μετρήσιμο RSRP < RSRP threshold του CE1 (επίπεδο βελτιωμένης κάλυψης 1) και το UE είναι ικανό για βελτιωμένο επίπεδο κάλυψης 1, τότε:
 - η MAC θεωρεί ότι βρίσκεται στο CE1 (επίπεδο βελτιωμένης κάλυψης 1)
- διαφορετικά η MAC θεωρεί ότι βρίσκεται σε επίπεδο βελτιωμένης κάλυψης 0

2.4 NB-IoT RACH Performance approach

2.4.1 D.1 Collision Probability, Pc

Ας υποθέσουμε ότι η συσκευή NB-IoT προχωρά ως εξής:

- Το δίκτυο διαμορφώνει τα επίπεδα CE και εκπέμπει τη λίστα των ορίων ισχύος για τα λαμβανόμενα σήματα αναφοράς των επιπέδων CE στην κυψέλη.
- Η συσκευή μετρά το RSRP για την επιλογή του επιπέδου CE της.
- Επιλέγει τυχαία το preamble από αυτά που έχουν αντιστοιχιστεί στο επιλεγμένο επίπεδο CE.
 - Η 3GPP ορίζει ότι κάθε πόρος PRACH περιέχει ένα σύνολο subcarriers και κάθε subcarrier αντιστοιχεί σε ένα preamble τυχαίας πρόσβασης (3GPP TS 36.321)
 - Ο αριθμός των preambles που διατίθενται σε κάθε επίπεδο CE είναι περιορισμένος και διαμορφώνεται από το δίκτυο.

Σημείωση: Σε περίπτωση μαζικά συνδεδεμένων συσκευών IoT, όπου ένας μεγάλος αριθμός συσκευών ενδέχεται να εκτελούν ταυτόχρονη τυχαία πρόσβαση, περισσότερες από μία συσκευές μπορούν να επιλέξουν το ίδιο προοίμιο με αποτέλεσμα Σύγκρουση τυχαίας πρόσβασης και στη συνέχεια αποτυχία προσβασιμότητας.

- Όσον αφορά τα διαφορετικά επίπεδα CE στο υπάρχον σύστημα NB-IoT, η συσκευή σε ενδεχόμενη αποτυχία της διαδικασίας RACH επιχειρεί πρώτα στο αρχικώς επιλεγμένο επίπεδο CE.
 - Η συσκευή συνεχίζει να δοκιμάζει επαναλήψεις στο επιλεγμένο επίπεδο CE μέχρι τον διαμορφωμένο μέγιστο αριθμό προσπαθειών σε αυτό το επίπεδο CE. (παράμετρος numRepetitionPerPreambleAttempt)
- Στη συνέχεια, η διαδικασία RACH ξεκινά ξανά στο επόμενο υψηλότερο CE

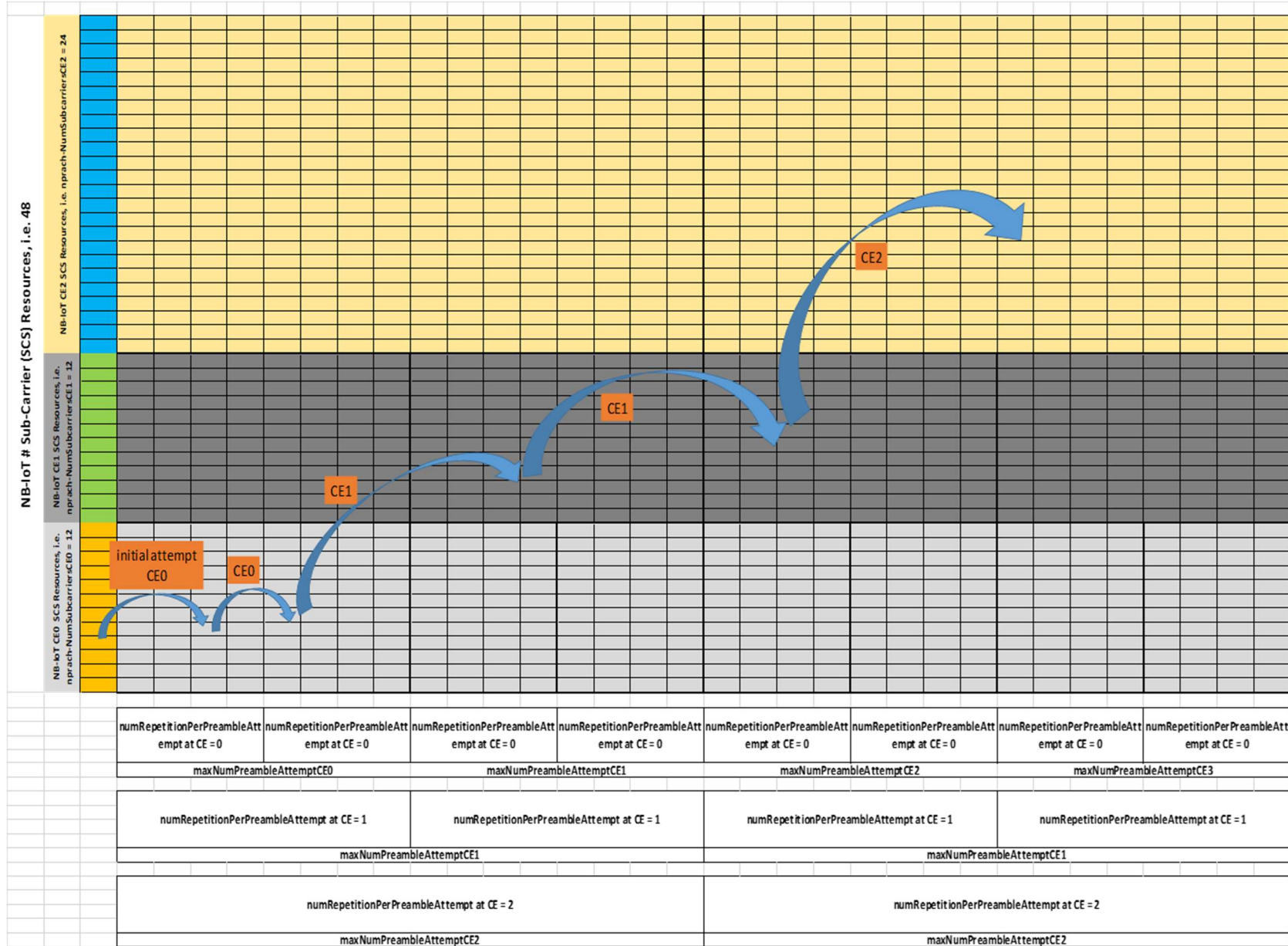
Ξεκινώντας με την πιθανότητα της επιτυχημένης Τυχαίας Πρόσβασης μετά από έναν ακριβή αριθμό n προσπαθειών θα θεωρηθεί η πιθανότητα $(n-1)$ ανεξάρτητων προσπαθειών αποτυχίας (σύγκρουσης) και η τελική n επιτυχημένη προσπάθεια:

$$P_n = (P_C)^{n-1}(1 - P_C)$$

όπου P_C η πιθανότητα σύγκρουσης.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για τη βελτιστοποίηση και τη βελτίωση της συμμόρφωσης RACH (συγκρούσεις) είναι η φραγή πρόσβασης (**ACB: access class barring**) στην οποία το eNodeB εκπέμπει έναν παραμετροποιήσιμο από τον χειριστη τελεστή φραγής, που ονομάζεται **ACB factor p** και έχει τιμή μεταξύ $[0, 1]$ όπως μια πιθανότητα. Επιλέγοντας τυχαία μια τιμή στο εύρος $[0,1]$, οι συσκευές IoT αποκτούν πρόσβαση στο δίκτυο εάν ο τυχαίος αριθμός είναι μικρότερος από τον **ACB factor p** , διαφορετικά, οι συσκευές αποκλείονται και περιμένουν την επόμενη ευκαιρία μετάδοσης. Υποθέτοντας ότι υπάρχουν N ενεργές συσκευές από τις N_A διαθέσιμες συσκευές στο σύστημα ($\{N_{A,0}, N_{A,1}, N_{A,2}\}$ ανά CE0, CE1, CE2 αντίστοιχα), όπου ενεργή σημαίνει συσκευή που έχει δεδομένα προς παράδοση, τότε η πιθανότητα $\{(m : |(m \neq 0) \cap (m < N)|)\}$ από N ενεργές συσκευές που περνούν τα κριτήρια ACB και επιχειρούν τη διαδικασία τυχαίας πρόσβασης είναι:

$$P(m|N) = \binom{N}{m} \rho^m (1 - \rho)^{N-m}$$



Εικόνα 15: NB-IoT Sub-Carrier Resources (Nscs)

Ας υποθέσουμε ότι οι N_{SCS} είναι τα διαμορφωμένα subcarriers σε συγκεκριμένο επίπεδο βελτίωσης CE, τότε η πιθανότητα ότι το ίδιο subcarrier που επιλέγεται από μια συσκευή NB-IoT θα επιλεγεί επίσης από μια άλλη συσκευή από m ABC επιτυχημένες συσκευές θα είναι:

$$P_{SCS} = 1 - \left(1 - 1/N_{SCS}\right)^m$$

Η πιθανότητα σύγκρουσης θα είναι η πιθανότητα οποιασδήποτε άλλης συσκευής που έχει απομείνει $(N-1)$, επιλέγοντας το ίδιο subcarrier:

$$\begin{aligned} P_C &= \sum_{m=1}^{N-1} P(m|N-1) \cdot P_{SCS} \\ &= \sum_{m=1}^{N-1} \binom{N-1}{m} \rho^m (1-\rho)^{N-m-1} \cdot \left(1 - \left(1 - 1/N_{SCS}\right)^m\right) \end{aligned}$$

Μέχρι εκείνο το σημείο, ένα σημαντικό ερώτημα θα μπορούσε να είναι ποιος είναι η βέλτιστη παραμετροποίηση του ACB factor ρ υπό την εξέταση συγκεκριμένου φόρτου κυκλοφορίας, αφού:

- εάν το ρ είναι μεγάλο, πολλές συσκευές περνούν τον έλεγχο ACB και έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα σύγκρουσης.
- εάν η τιμή ρ είναι πολύ μικρή, τότε πολλές προσπάθειες preambles αποτυγχάνουν με σπατάλη διαθέσιμων πόρων.

Γενικά θα ακολουθήσουμε δύο προσεγγίσεις.

2.4.1.1 1^η προσέγγιση: Γενικό ACB analysis

Επιτρέψτε στον χειριστή να επιλέξει δυναμικά την τιμή του ACB factor ρ με βάση το συγκεκριμένο φόρτο κυκλοφορίας, ως παράμετρο βελτιστοποίησης. Έπειτα:

$$\begin{aligned} P_C &= \sum_{m=1}^{N-1} \binom{N-1}{m} \rho^m (1-\rho)^{N-m-1} \cdot \left(1 - \left(1 - 1/N_{SCS}\right)^m\right) = \\ &= \sum_{m=1}^{N-1} \binom{N-1}{m} \rho^m (1-\rho)^{N-m-1} \\ &\quad - \sum_{m=1}^{N-1} \binom{N-1}{m} \rho^m (1-\rho)^{N-m-1} \cdot \left(1 - 1/N_{SCS}\right)^m \end{aligned}$$

Ο πρώτος όρος γίνεται:

$$\begin{aligned} &\sum_{m=1}^{N-1} \binom{N-1}{m} \rho^m (1-\rho)^{N-m-1} + \binom{N-1}{m} \rho^m (1-\rho)^{N-m-1} \Big|_{m=0} \\ &\quad - \binom{N-1}{m} \rho^m (1-\rho)^{N-m-1} \Big|_{m=0} = \\ &\quad \left(\sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} \rho^m (1-\rho)^{N-m-1} \right) - (1-\rho)^{N-1} \end{aligned}$$

Χρησιμοποιώντας τον τύπο διωνυμικής κατανομής (*H* διωνυμική κατανομή είναι μια διακριτή συνάρτηση κατανομής τυχαίας μεταβλητής. Περιγράφει ένα τυχαίο πείραμα με δυο πιθανά αποτελέσματα (επιτυχία - αποτυχία) και πιθανότητα επιτυχίας p που επαναλαμβάνεται n φορές):

$$(x + y)^{N-1} = \sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} x^m y^{N-m-1}$$

Για $x = \rho$ και $y = 1 - \rho$ τότε:

$$\begin{aligned} & \left(\sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} \rho^m (1-\rho)^{N-m-1} \right) - (1-\rho)^{N-1} = \\ & = \\ & = (\rho + 1 - \rho)^{N-1} - (1-\rho)^{N-1} = 1 - (1-\rho)^{N-1} \end{aligned}$$

Ο δεύτερος όρος γίνεται:

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^{N-1} \binom{N-1}{m} \rho^m (1-\rho)^{N-m-1} \cdot \left(1 - 1/N_{scs}\right)^m \\ & = \sum_{m=1}^{N-1} \binom{N-1}{m} \left(\left(1 - 1/N_{scs}\right) \rho \right)^m (1-\rho)^{N-m-1} = \\ & = \sum_{m=1}^{N-1} \binom{N-1}{m} \left(\left(1 - 1/N_{scs}\right) \rho \right)^m (1-\rho)^{N-m-1} \\ & \quad + \binom{N-1}{m} \left(\left(1 - 1/N_{scs}\right) \rho \right)^m (1-\rho)^{N-m-1} \Big|_{m=0} \\ & \quad - \binom{N-1}{m} \left(\left(1 - 1/N_{scs}\right) \rho \right)^m (1-\rho)^{N-m-1} \Big|_{m=0} = \\ & = \left(\sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} \left(\left(1 - 1/N_{scs}\right) \rho \right)^m (1-\rho)^{N-m-1} \right) - (1-\rho)^{N-1} \end{aligned}$$

Χρησιμοποιώντας άλλη μια φορά τον τύπο διωνυμικής κατανομής για $x = \left(1 - 1/N_{scs}\right) \rho$ και $y = 1 - \rho$ τότε:

$$\begin{aligned} & \left(\sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} \left(\left(1 - 1/N_{scs}\right) \rho \right)^m (1-\rho)^{N-m-1} \right) - (1-\rho)^{N-1} = \\ & = \left(\left(1 - 1/N_{scs}\right) \rho + 1 - \rho \right)^{N-1} - (1-\rho)^{N-1} = \left(1 - \rho/N_{scs}\right)^{N-1} - (1-\rho)^{N-1} \end{aligned}$$

Συμπερασματικά, η πιθανότητα σύγκρουσης γίνεται:

$$P_C = 1 - (1-\rho)^{N-1} - \left(1 - \rho/N_{scs}\right)^{N-1} + (1-\rho)^{N-1} = 1 - \left(1 - \rho/N_{scs}\right)^{N-1}$$

2.4.1.2 2^η προσέγγιση: Βελτιστοποιημένο ACB analysis

Η βέλτιστη τιμή για τον ACB factor ρ , μεγιστοποιώντας την πιθανότητα μετάδοσης, συμπεραίνεται ως:

$$\rho = \begin{cases} N_{scs}/N, & N_{scs}/N \leq 1 \\ 1, & N_{scs}/N > 1 \end{cases} = \min(1, N_{scs}/N)$$

Αντικαθιστώντας για $\rho = N_{scs}/N \leq 1$ (που είναι μια καλή υπόθεση):

$$P_C = 1 - \left(1 - \rho/N_{scs}\right)^{N-1} \Big|_{\rho=N_{scs}/N} = 1 - \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{N-1}$$

Για λόγους συνέπειας ακολουθεί η αναλυτική εξαγωγή της πιθανότητας σύγκρουσης στη 2η Προσέγγιση:

$$\begin{aligned} P_C &= \sum_{m=1}^{N-1} \binom{N-1}{m} \left(N_{scs}/N\right)^m \left(1 - \left(N_{scs}/N\right)\right)^{N-m-1} \left(1 - \left(1 - 1/N_{scs}\right)^m\right) \\ &= \sum_{m=1}^{N-1} \binom{N-1}{m} \left(N_{scs}/N\right)^m \left(1 - \left(N_{scs}/N\right)\right)^{N-m-1} \\ &\quad - \sum_{m=1}^{N-1} \binom{N-1}{m} \left(N_{scs}/N\right)^m \left(1 - \left(N_{scs}/N\right)\right)^{N-m-1} \left(1 - 1/N_{scs}\right)^m \end{aligned}$$

Ο πρώτος όρος γίνεται:

$$\begin{aligned} &\sum_{m=1}^{N-1} \binom{N-1}{m} \left(N_{scs}/N\right)^m \left(1 - \left(N_{scs}/N\right)\right)^{N-m-1} \\ &\quad + \binom{N-1}{m} \left(N_{scs}/N\right)^m \left(1 - \left(N_{scs}/N\right)\right)^{N-m-1} \Big|_{m=0} \\ &\quad - \binom{N-1}{m} \left(N_{scs}/N\right)^m \left(1 - \left(N_{scs}/N\right)\right)^{N-m-1} \Big|_{m=0} = \\ &\sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} \left(N_{scs}/N\right)^m \left(1 - \left(N_{scs}/N\right)\right)^{N-m-1} - \left(1 - \left(N_{scs}/N\right)\right)^{N-1} \end{aligned}$$

Χρησιμοποιώντας τον τύπο διωνυμικής κατανομής:

$$(x + y)^{N-1} = \sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} x^m y^{N-m-1}$$

τότε:

$$\begin{aligned} &\sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} \left(N_{scs}/N\right)^m \left(1 - \left(N_{scs}/N\right)\right)^{N-m-1} - \left(1 - \left(N_{scs}/N\right)\right)^{N-1} = \\ &= \left(N_{scs}/N + 1 - \left(N_{scs}/N\right)\right)^{N-1} - \left(1 - \left(N_{scs}/N\right)\right)^{N-1} = 1 - \left(1 - \left(N_{scs}/N\right)\right)^{N-1} \end{aligned}$$

Ο δεύτερος όρος γίνεται:

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=1}^{N-1} \binom{N-1}{m} \left(\frac{N_{scs}}{N}\right)^m \left(1 - \left(\frac{N_{scs}}{N}\right)\right)^{N-m-1} \left(1 - \frac{1}{N_{scs}}\right)^m = \\
& = \sum_{m=1}^{N-1} \binom{N-1}{m} \left(\left(1 - \frac{1}{N_{scs}}\right) \left(\frac{N_{scs}}{N}\right)\right)^m \left(1 - \left(\frac{N_{scs}}{N}\right)\right)^{N-m-1} = \\
& = \sum_{m=1}^{N-1} \binom{N-1}{m} \left(\frac{N_{scs}-1}{N}\right)^m \left(1 - \left(\frac{N_{scs}}{N}\right)\right)^{N-m-1} = \\
& = \sum_{m=1}^{N-1} \binom{N-1}{m} \left(\frac{N_{scs}-1}{N}\right)^m \left(1 - \left(\frac{N_{scs}}{N}\right)\right)^{N-m-1} \\
& \quad + \binom{N-1}{m} \left(\frac{N_{scs}-1}{N}\right)^m \left(1 - \left(\frac{N_{scs}}{N}\right)\right)^{N-m-1} \Big|_{m=0} \\
& \quad - \binom{N-1}{m} \left(\frac{N_{scs}-1}{N}\right)^m \left(1 - \left(\frac{N_{scs}}{N}\right)\right)^{N-m-1} \Big|_{m=0} = \\
& = \sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} \left(\frac{N_{scs}-1}{N}\right)^m \left(1 - \left(\frac{N_{scs}}{N}\right)\right)^{N-m-1} - \left(1 - \left(\frac{N_{scs}}{N}\right)\right)^{N-1}
\end{aligned}$$

Χρησιμοποιώντας άλλη μια φορά τον τύπο διωνυμικής κατανομής

$$(x + y)^{N-1} = \sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} x^m y^{N-m-1}$$

τότε:

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=0}^{N-1} \binom{N-1}{m} \left(\frac{N_{scs}-1}{N}\right)^m \left(1 - \left(\frac{N_{scs}}{N}\right)\right)^{N-m-1} - \left(1 - \left(\frac{N_{scs}}{N}\right)\right)^{N-1} = \\
& = \left(\frac{N_{scs}-1}{N} + 1 - \left(\frac{N_{scs}}{N}\right)\right)^{N-1} - \left(1 - \left(\frac{N_{scs}}{N}\right)\right)^{N-1} \\
& = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{N-1} - \left(1 - \left(\frac{N_{scs}}{N}\right)\right)^{N-1}
\end{aligned}$$

Συμπερασματικά, η πιθανότητα σύγκρουσης γίνεται:

$$\begin{aligned}
P_C & = 1 - \left(1 - \left(\frac{N_{scs}}{N}\right)\right)^{N-1} - \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{N-1} + \left(1 - \left(\frac{N_{scs}}{N}\right)\right)^{N-1} \\
& = 1 - \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{N-1}
\end{aligned}$$

2.4.2 D.2 RACH Success Probability per CE, ONLY due to Collision P_{RACH}

Ας υποθέσουμε ότι η συσκευή NB-IoT συνεχίζει με έναν διαμορφώσιμο αριθμό προσπαθειών ανά CE και ας πούμε αυτόν τον αριθμό ως N_a^{CE} , N_a^{CE1} , N_a^{CE2} αντίστοιχα. Επιπλέον, η ισχύς του σήματος αναφοράς (RSRP) είναι ένας γραμμικός μέσος όρος της ισχύος σε Watt των στοιχείων πόρων που φέρουν NRS σε ένα δεδομένο εύρος ζώνης συχνότητας. Δεδομένου ότι η κατερχόμενη ζεύξη NB-IoT βασίζεται σε 15 kHz

απόσταση φορέα, το RSRP είναι η ισχύς ενός μεμονωμένου NRS 15 kHz. Με βάση αυτόν τον τύπο μέτρησης λαμβάνεται το SINR. Η συσκευή NB-IoT αποφασίζει εάν θα ξεκινήσει μια αρχική προσπάθεια τυχαίας πρόσβασης από τα CE0, CE1 ή CE2, συγκρίνοντας το λαμβανόμενο SINR με δύο κατώφλια SINR $\{S_1 > S_2, S_2\}$, που μεταδόθηκε από το SIB2, σύμφωνα με τον ακόλουθο κανόνα:

$$\begin{cases} SINR_r \geq S_1, IoT \text{ Συσκευή επιλέγει CE0} \\ S_2 \leq SINR_r < S_1, IoT \text{ Συσκευή επιλέγει CE1} \\ SINR_r \leq S_2, IoT \text{ Συσκευή επιλέγει CE2} \end{cases}$$

Με βάση την προηγούμενη δήλωση, γιατί από τον συνολικό αριθμό N των συσκευών NB-IoT στον τομέα συμπεραίνουμε σε τρεις τιμές πιθανότητας $\{p_0, p_1, p_2\}$ σύμφωνα με την ακόλουθη απόφαση:

$$p_0 = \frac{\text{sector area where } SINR_r \geq S_1}{\text{total sector area}}$$

$$p_1 = \frac{\text{sector area where } S_2 \leq SINR_r < S_1}{\text{total sector area}}$$

$$p_2 = \frac{\text{sector area where } SINR_r \leq S_2}{\text{total sector area}}$$

ορίζοντας το ποσοστό των διαθέσιμων συσκευών ανά επίπεδο βελτίωσης κάλυψης CE0, CE1, CE2 αντίστοιχα.

Ο αριθμός των μέγιστων NB-IoT preamble επαναληπτικών προσπαθειών (προσπάθειες τυχαίας πρόσβασης) μπορεί να διαμορφωθεί και παρέχεται ως $N_{a,0}, N_{a,1}, N_{a,2}$ για τα διαφορετικά επίπεδα CE0, CE1, CE2 αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τη 3GPP, ενώ η αρχική επιλογή του επιπέδου CE για την πρώτη προσπάθεια RAP βασίζεται σε σαφή σύγκριση και μετρήσεις SINR, η επόμενη επανάληψη ακολουθεί πάντα τον μέγιστο αριθμό επαναληπτικών προσπαθειών NB-IoT στο ίδιο CE. Δεν είναι. Η αναμενόμενη αποτυχία σε οποιαδήποτε προσπάθεια εκτός του μέγιστου, μπορεί να προκύψει είτε λόγω σύγκρουσης RACH είτε λόγω κακών συνθηκών καναλιού (υποδηλώνεται από το BLER και το SINR). Επομένως, είναι απαραίτητο να λάβετε μια ρητή πιθανότητα ποσοστού επιτυχίας RACH, συμπεριλαμβανομένων τόσο της σύγκρουσης όσο και της συνεισφοράς στην ποιότητα του ραδιοφωνικού καναλιού. Αρκετές περιπτώσεις μελετώνται χωριστά.

2.4.2.1 D.2. Υπόθεση 1a: Η συσκευή ξεκινά την αρχική προσπάθεια στο επίπεδο CE0 και τερματίζει στο CE0

Αυτό είναι το σενάριο των (N_0) ενεργών συσκευών NB-IoT υπό την προϋπόθεση $SINR_r \geq S_1$

Η επακόλουθη πιθανότητα επιτυχίας RACH της συσκευής NB-IoT σε επίπεδο CE0 για δοκιμές επανάληψης $n \leq N_{a,0}$ είναι:

$$P_{RACH,S,(0 \rightarrow 0)} = \begin{cases} (1 - P_{C,CE0}) = 1 - \left(1 - \left(1 - \frac{\rho}{N_{SCS,0}}\right)^{N_0-1}\right) & n = 1 \\ \sum_{i=2}^n P_{C,CE0} (1 - (1 - P_{C,CE0})p_o)^{i-2} ((1 - P_{C,CE0})p_o) & 2 \leq n \leq N_{a,0} \end{cases}$$

Η επακόλουθη πιθανότητα αποτυχίας RACH της συσκευής NB-IoT σε επίπεδο CE0 για δοκιμές μέγιστης επανάληψης $n = N_{a,0}$, που οδηγεί προφανώς στο επόμενο επίπεδο προσπαθειών CE1, είναι:

$$P_{RACH,F,(0 \rightarrow 0)} = P_{C,CE} (1 - (1 - P_{C,CE0})p_o)^{N_{a,0}-1}$$

2.4.2.2 D.2. Υπόθεση 1b: Η συσκευή ξεκινά την αρχική προσπάθεια στο επίπεδο CE0 και συνεχίζει στο επίπεδο CE1

Αυτό είναι το σενάριο των (N_0) συσκευών NB-IoT υπό την προϋπόθεση $SINR_r \geq S_1$, υποθέτοντας ότι η συσκευή NB-IoT ξεκινά απόπειρα τυχαίας πρόσβασης στο CE0, αποτυγχάνει και συνεχίζει στο επόμενο επίπεδο CE1 με αριθμό προσπαθειών $N_{a,0} < n \leq (N_{a,0} + N_{a,1})$.

Η επακόλουθη πιθανότητα επιτυχίας RACH για $N_{a,0} < n \leq (N_{a,0} + N_{a,1})$ είναι:

$$P_{RACH,S,(0 \rightarrow 1)} = \sum_{i=N_{a,0}+1}^n P_{RACH,F,(0 \rightarrow 0)} (1 - (1 - P_{C,CE1})(p_o + p_1))^{i-N_{a,0}-1} ((1 - P_{C,CE1})(p_o + p_1))$$

Η επακόλουθη πιθανότητα αποτυχίας RACH της συσκευής NB-IoT που ξεκινά αρχικά στο επίπεδο CE0 για δοκιμές μέγιστης επανάληψης $= N_{a,0}$, που οδηγεί προφανώς στο επόμενο επίπεδο CE1 μέγιστων προσπαθειών για $n = (N_{a,0} + N_{a,1})$, είναι:

$$P_{RACH,F,(0 \rightarrow 1)} = P_{RACH,F,(0 \rightarrow 0)} (1 - (1 - P_{C,CE1})(p_o + p_1))^{N_{a,1}}$$

2.4.2.3 D.2. Υπόθεση 1c: Η συσκευή ξεκινά την αρχική προσπάθεια στο επίπεδο CE0 και ολοκληρώνεται στο επίπεδο CE2

Αυτό είναι το σενάριο των (N_0) συσκευών NB-IoT υπό την συνθήκη $SINR_r \geq S_1$, υποθέτοντας ότι η συσκευή NB-IoT ξεκινά απόπειρα τυχαίας πρόσβασης στο CE0 και αποτυγχάνει, συνεχίζει στο CE1 με συνολικό αριθμό $n = (N_{a,0} + N_{a,1})$ επιχειρεί, αποτυγχάνει ξανά και καταλήγει στο CE2 με συνολικό αριθμό $(N_{a,0}) < n \leq (N_{a,0} + N_{a,1} + N_{a,2})$ προσπάθειες.

Η επακόλουθη πιθανότητα επιτυχίας RACH για $(N_{a,0} + N_{a,1}) < n \leq (N_{a,0} + N_{a,1} + N_{a,2})$ είναι:

$$P_{RACH,S,(0 \rightarrow 2)} = \sum_{i=(N_{a,0}+N_{a,1}+1)}^n P_{RACH,F,(0 \rightarrow 1)} (P_{C,CE2})^{(i-N_{a,0}-N_{a,1}-1)} (1 - P_{C,CE})$$

Η επακόλουθη πιθανότητα αποτυχίας RACH της συσκευής NB-IoT που ξεκινά αρχικά στο επίπεδο CE0 για δοκιμές μέγιστης επανάληψης $n = N_{a,0}$, που οδηγεί προφανώς στα επόμενα επίπεδα προσπαθειών CE1 και CE2 για $N_{a,0} < n \leq (N_{a,0} + N_{a,1} + N_{a,2})$, όπου τελικά αποτυγχάνει είναι:

$$P_{RACH,F,(0 \rightarrow 2)} = P_{RACH,F,(0 \rightarrow 1)} (P_{C,CE2})^{N_{a,2}}$$

2.4.2.4 D.2.Υπόθεση 2a: Η συσκευή ξεκινά την αρχική προσπάθεια στο επίπεδο CE1 και τερματίζει στο CE1

Αυτό είναι το σενάριο (N_1) ενεργών συσκευών NB-IoT υπό την προϋπόθεση $S_2 \leq SINR_r < S_1$. Η επακόλουθη πιθανότητα επιτυχίας RACH της συσκευής NB-IoT σε επίπεδο CE1 για δοκιμές επανάληψης $n \leq N_{a,1}$ είναι:

$$P_{RACH,S,(1 \rightarrow 1)} = \begin{cases} (1 - P_{C,CE1}) = 1 - \left(1 - \left(1 - \frac{\rho}{N_{SCS,1}}\right)^{N_1 - 1}\right) & n = 1 \\ \sum_{i=2}^n P_{C,CE1} (1 - (1 - P_{C,CE1})p_1)^{i-2} ((1 - P_{C,CE1})p_1) & 2 \leq n \leq N_{a,1} \end{cases}$$

Η επακόλουθη πιθανότητα αποτυχίας RACH (N_1) ενεργής συσκευής NB-IoT σε επίπεδο CE1 για δοκιμές μέγιστης επανάληψης $n = N_{a,1}$, που οδηγεί προφανώς σε ένα επόμενο βήμα στο επόμενο επίπεδο προσπαθειών CE2, είναι:

$$P_{RACH,F,(1 \rightarrow 1)} = P_{C,CE1} (1 - (1 - P_{C,CE1})p_1)^{N_{a,1} - 1}$$

2.4.2.5 D.2.Υπόθεση 2b: Η συσκευή ξεκινά την αρχική προσπάθεια στο επίπεδο CE1 και ολοκληρώνεται στο επίπεδο CE2

Αυτό είναι το σενάριο των (N_1) ενεργών συσκευών NB-IoT υπό την προϋπόθεση $S_2 \leq SINR_r < S_1$, υποθέτοντας ότι η συσκευή NB-IoT ξεκινά απόπειρα τυχαίας πρόσβασης στο CE1 και συνεχίζει στο CE2 με συνολικό αριθμό $N_{a,1} < n \leq (N_{a,1} + N_{a,2})$ προσπάθειες.

Η επακόλουθη πιθανότητα επιτυχίας RACH για $N_{a,1} < n \leq (N_{a,1} + N_{a,2})$ είναι:

$$P_{RACH,S,(1 \rightarrow 2)} = \sum_{i=N_{a,1}+1}^n P_{RACH,F,(1 \rightarrow 1)} \left(1 - (1 - P_{C,CE2})(p_1 + p_2)\right)^{i - N_{a,1} - 1} \left((1 - P_{C,CE2})(p_1 + p_2)\right)$$

Η επακόλουθη πιθανότητα αποτυχίας RACH της συσκευής NB-IoT σε επίπεδο CE1 για δοκιμές μέγιστης επανάληψης $n = N_{a,1}$, που οδηγεί προφανώς στο επόμενο επίπεδο CE2 μέγιστες επαναλήψεις με $N_{a,1} < n \leq (N_{a,1} + N_{a,2})$ και τελικά αποτυγχάνει είναι:

$$P_{RACH,F,(1 \rightarrow 2)} = P_{RACH,F,(1 \rightarrow 1)} \left(1 - (1 - P_{C,CE2})(p_1 + p_2)\right)^{N_{a,2}}$$

2.4.2.6 D.2. Υπόθεση 3α: Η συσκευή ξεκινά την αρχική προσπάθεια σε επίπεδο CE2

Αυτό είναι το σενάριο των (N_2) ενεργών συσκευών NB-IoT υπό την προϋπόθεση $SINR_r \leq S_2$. Η επακόλουθη πιθανότητα επιτυχίας RACH της συσκευής NB-IoT σε επίπεδο CE1 για δοκιμές επανάληψης $n \leq N_{a,2}$ είναι:

$$P_{RACH,S,(2 \rightarrow 2)} = \begin{cases} (1 - P_{C,CE2}) = 1 - \left(1 - \left(1 - \frac{\rho}{N_{SCS,2}}\right)^{N_2-1}\right) & n = 1 \\ \sum_{i=2}^n P_{C,CE2} (1 - (1 - P_{C,CE2})p_2)^{i-2} ((1 - P_{C,CE})p_2) & 2 < n \leq N_{a,2} \end{cases}$$

Η επακόλουθη πιθανότητα αποτυχίας RACH των (N_2) ενεργών συσκευών NB-IoT που ξεκινούν αρχικά στο επίπεδο CE2 για μέγιστες δοκιμές επανάληψης $n = N_{a,2}$, είναι:

$$P_{RACH,F,(2 \rightarrow 2)} = P_{C,CE2} (1 - (1 - P_{C,CE})p_2)^{N_{a,2}-1}$$

Κεφάλαιο 3

Για να επικυρώσουμε τα αριθμητικά αποτελέσματα, πραγματοποιήσαμε προσομοιώσεις σε επίπεδο συστήματος. Χρησιμοποιήσαμε το Matlab για την υλοποίηση του σεναρίου προσομοίωσης. Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν αρκετές φορές. Τα βήματα της προσομοίωσης εξηγούνται παρακάτω:

- Εξετάζουμε ένα μεμονωμένο κύτταρο στο οποίο οι ενεργές συσκευές που απαιτούνται για την εκτέλεση του RAP είναι τυχαία κατανομημένες.
- Μια συγκεκριμένη συσκευή που αποτυγχάνει σε μια προσπάθεια RAP ελέγχει την κατάσταση του καναλιού για μια νέα προσπάθεια και επιλέγει την κατάσταση του επιπέδου CE με βάση την κατάσταση του καναλιού.
- Το επίπεδο CE που επιλέγει η συσκευή αποτελείται από πρόσφατα ενεργοποιημένες συσκευές.
- Το επιλεγμένο επίπεδο CE λογικά θα έχει ήδη συγκρουστεί με άλλες συσκευές που έχουν κάνει μια νέα προσπάθεια RAP μαζί με την εν λόγω συσκευή. Έτσι, η εν λόγω συσκευή ανταγωνίζεται για το προίμιο με πρόσφατα ενεργοποιημένες συσκευές καθώς και με συσκευές που έχουν αποτύχει προηγουμένως και οι οποίες επιλέγουν τυχαία αυτό το επίπεδο CE μετά από επαναληπτικές προσπάθειες RSRP.
- Επιτρέπουμε στο χειρίστη να επιλέξει δυναμικά την τιμή του παραγοντα ACB με βάση το συγκεκριμένο φορτίο κυκλοφορίας ως παράμετρο βελτιστοποίησης.
- Η συσκευή επιλέγει έναν τυχαίο αριθμό μεταξύ 0 και 1. Ο επιλεγμένος αριθμός συγκρίνεται με τον παράγοντα ACB. Εάν ο αριθμός είναι μικρότερος από τον παράγοντα ACB, η συσκευή δεν μπορεί να μεταδώσει.
- Η συσκευή επιλέγει το προίμιο για μετάδοση στην καθορισμένη χρονική περίοδο. Χρησιμοποιούμε τον αλγόριθμο μετάδοσης S-ALOHA, ο οποίος διαιρεί το χρόνο σε διαδοχικές χρονοθυρίδες. Εάν δύο συσκευές επιλέξουν το ίδιο προίμιο στην ίδια χρονοθυρίδα, θεωρείται σύγκρουση. Η συσκευή μπορεί να μεταδώσει επιτυχώς το προίμιο μόνο εάν είναι διαφορετικό από τις άλλες συσκευές.
- Οι συσκευές που συγκρούονται επιλέγουν και πάλι το νέο επίπεδο CE για μετάδοση στην επόμενη χρονοθυρίδα στο PE-RAP και αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται.
- Η συσκευή αποφασίζει εάν θα ξεκινήσει μια αρχική προσπάθεια τυχαίας πρόσβασης από το CE0, το CE1 ή το CE2 συγκρίνοντας την τιμή SINR που λαμβάνει με δύο κατώφλια SINR που μεταδίδονται από το SIB2, σύμφωνα με τον κανόνα.
- Έτσι, η επιλογή του επιπέδου CE για την επανάληψη θα είναι διαφορετική για όλες τις συσκευές. Όλες οι συσκευές που προσπαθούν να εισέλθουν σε ένα επίπεδο CE σε μια χρονική στιγμή μπορούν να προσπαθήσουν ξανά με διαφορετικό επίπεδο CE στην επόμενη χρονική στιγμή.
- Στο τέλος της κάθε προσομοίωσης έχουμε τις γραφικές παραστάσεις των συσκευών που κάνουν την προσπάθεια μετάδοσης σε συγκεκριμένο επίπεδο CE

και μπορούμε να δούμε την σχέση της πιθανότητας αποτυχίας με την πιθανότητα σύγκρουσης.

- Η προσομοίωση επαναλαμβάνεται αρκετές φορές για όλα τα σενάρια που αναλύουμε σε προηγούμενο κεφάλαιο και τα αποτελέσματα υπολογίζονται κατά μέσο όρο για να ληφθούν τα αποτελέσματα από την σύγκριση αναμεσα στις πιθανότητες αποτυχίας και σύγκρουσης σε κάθε επίπεδο CE.

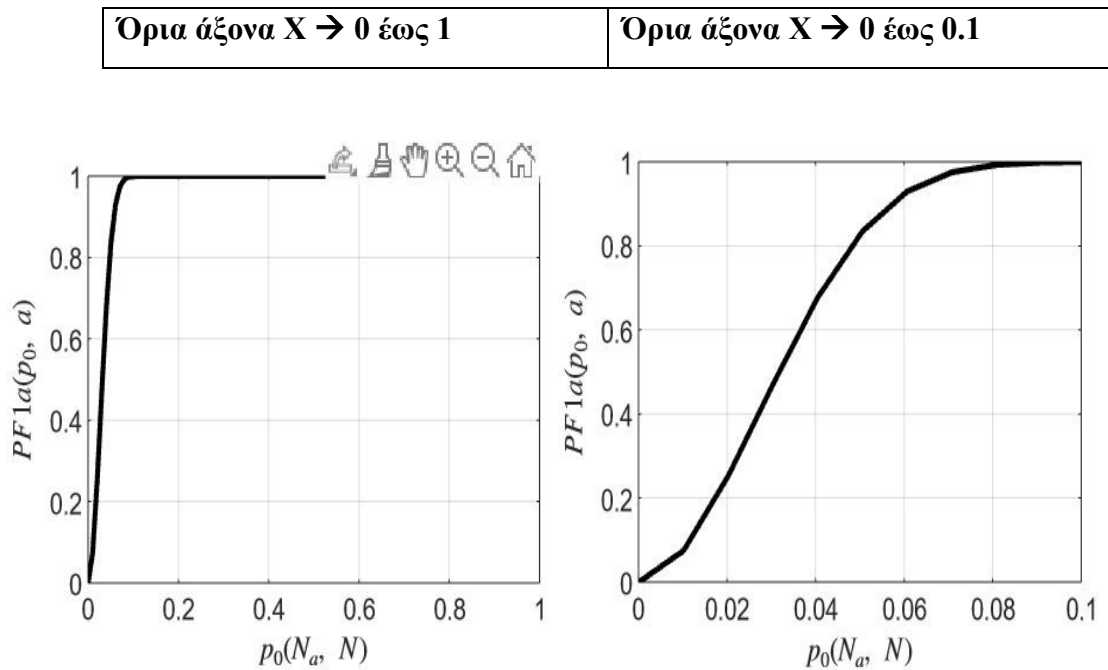
3.1 Προσομοιώσεις

1. Ξεκινώντας θεωρούμε τρεις μεταβλητές να κυμαίνονται στις τιμές $N_{CE0} \in (1,10000)$, $N_{CE1} \in (1,6000)$ και $N_{CE2} \in (1,3000)$, οπότε αντιστοίχως υπολογίζουμε τις εξισώσεις $P_{C,CE0}$ και $P_{C,CE1}$ και $P_{C,CE2}$ βάσει του τύπου.
2. Στην συνέχεια θεωρούμε τρεις σταθερές τιμές $N_{\alpha0}$, $N_{\alpha1}$ και $N_{\alpha2}$ οι οποίες είναι ο αριθμός των προσπαθειών σε κάθε p_0 , p_1 και p_2 μέρος του sector. Σε αυτές τις τιμές βάζουμε τρεις διακριτές τιμές $N_{\alpha0} = N_{\alpha1} = N_{\alpha2} = 10, 20, 50$
3. Επιπροσθέτως βάσει των προηγούμενων μεταβλητών N_{CE0} , N_{CE1} , N_{CE2} για κάθε μία τιμή των $N_{\alpha0}$, $N_{\alpha1}$, $N_{\alpha2}$ παίρνουμε τους τύπους οι οποίοι ξεκινάνε από το D2 και παρουσιάζουμε ως παραμετρικές καμπύλες τα PRACH.
4. Τέλος μελετάμε και σχολιάζουμε πως μεταβάλλεται η πιθανότητα αποτυχίας βάσει των διαφορετικών τιμών των N_{α} παραμέτρων.

Πιθανότητες σύγκρουσης:			
$a = P_{C,CE0}$	$b = P_{C,CE1}$	$c = P_{C,CE2}$	$Nab = Na + Nb$
Ποσοστό διαθέσιμων συσκευών ανά επίπεδο:			
$p0 = Na/N$	$p1 = Nb/N$	$p2 = Nc/N$	$Nbc = Nb + Nc$
$p01 = Nab/N$		$p12 = Nbc/N$	
Πιθανότητες αποτυχίας:			
$PF1a \rightarrow P_{RACH,S,(0 \rightarrow 0)}$		$PF1b \rightarrow P_{RACH,S,(0 \rightarrow 1)}$	
$PF1c \rightarrow P_{RACH,F,(0 \rightarrow 2)}$		$PF2a \rightarrow P_{RACH,F,(1 \rightarrow 1)}$	
$PF2b \rightarrow P_{RACH,F,(1 \rightarrow 2)}$		$PF3a \rightarrow P_{RACH,F,(2 \rightarrow 2)}$	

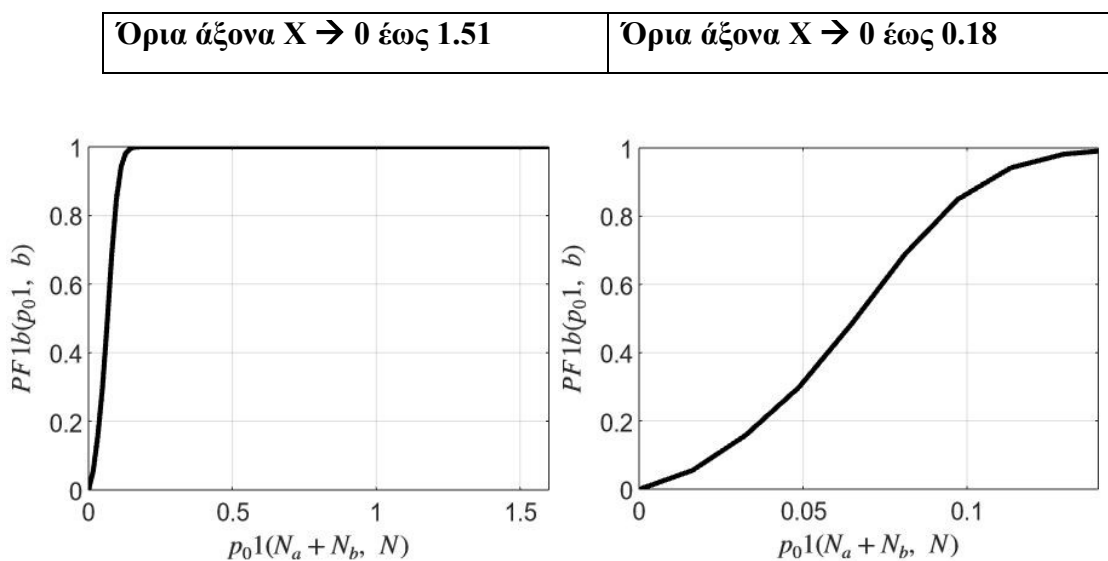
Πίνακας 1: Επεξηγήσεις συντομογραφιών

3.1.1 D.2.Υπόθεση 1a: Η συσκευή ξεκινά την αρχική προσπάθεια στο επίπεδο CE0 και τερματίζει στο CE0, υπό την προϋπόθεση $SINR_r \geq S_1$



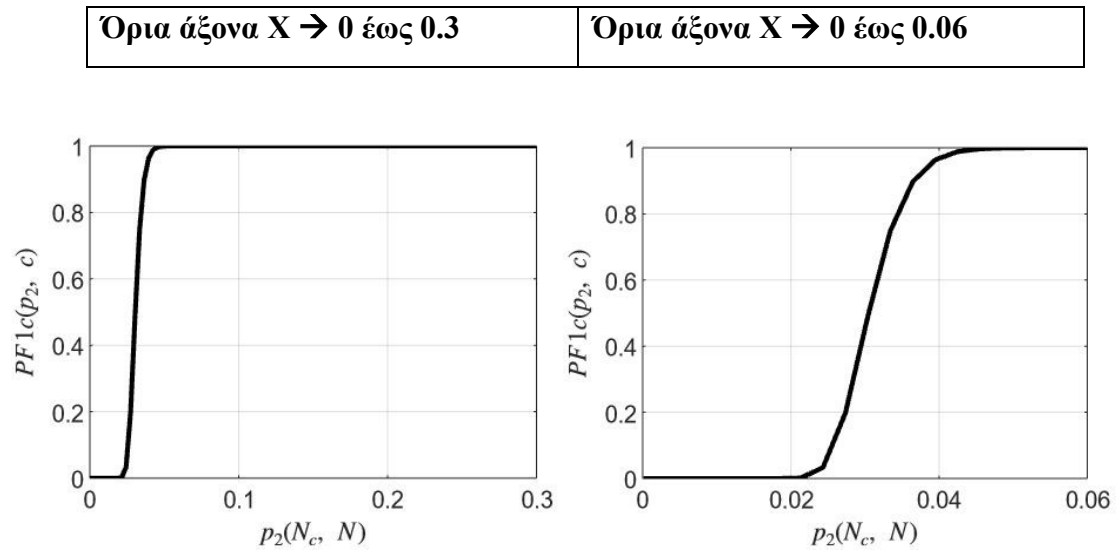
Εικόνα 16: $P_{RACH,S,(0 \rightarrow 0)}$

3.1.2 D.2.Υπόθεση 1b: Η συσκευή ξεκινά την αρχική προσπάθεια στο επίπεδο CE0 και συνεχίζει στο επίπεδο CE1



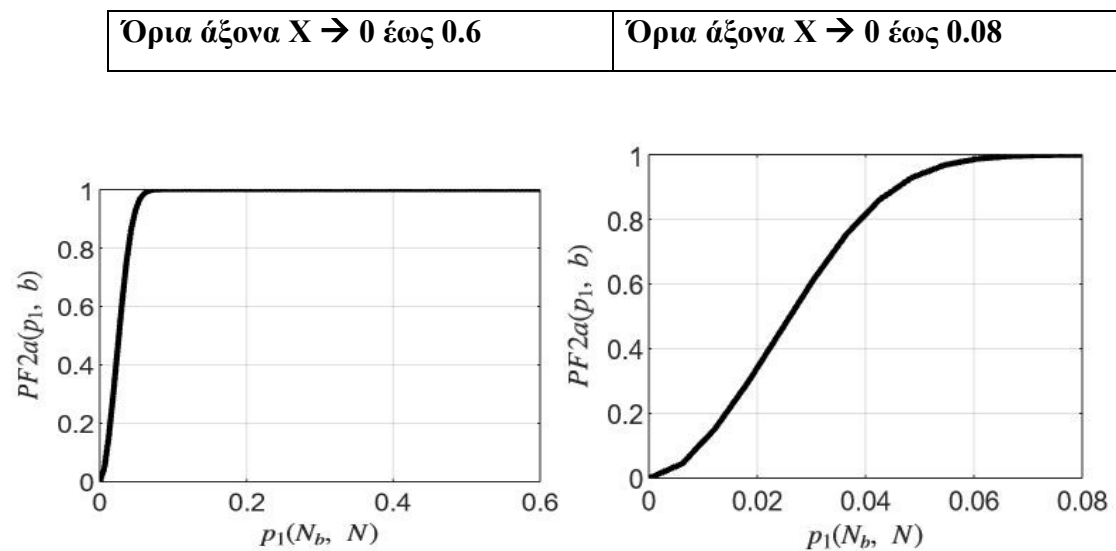
Εικόνα 17: $P_{RACH,S,(0 \rightarrow 1)}$

3.1.3 D.2.Υπόθεση 1c: Η συσκευή ξεκινά την αρχική προσπάθεια στο επίπεδο CE0 και ολοκληρώνεται στο επίπεδο CE2



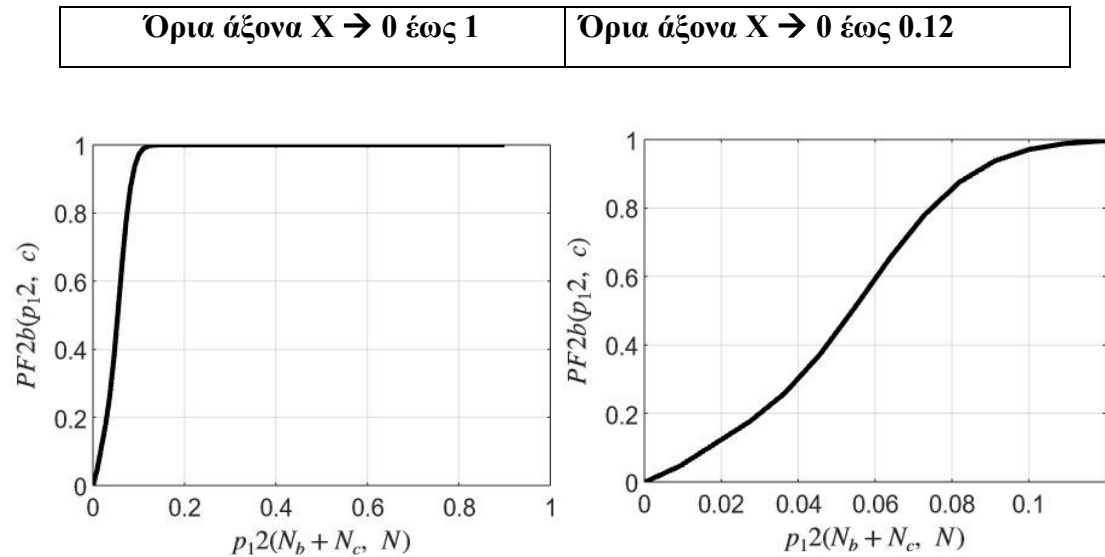
Εικόνα 18: $P_{RACH,F,(0 \rightarrow 2)}$

3.1.4 D.2.Υπόθεση 2α: Η συσκευή ξεκινά την αρχική προσπάθεια στο επίπεδο CE1 και τερματίζει στο CE1



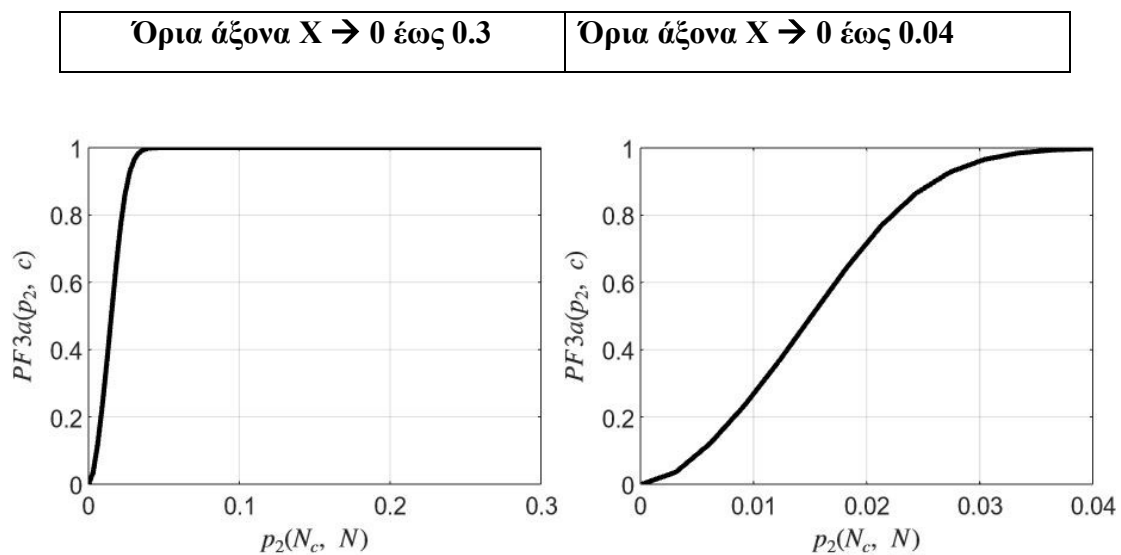
Εικόνα 19: $P_{RACH,F,(1 \rightarrow 1)}$

3.1.5 D.2.Υπόθεση 2b: Η συσκευή ξεκινά την αρχική προσπάθεια στο επίπεδο CE1 και ολοκληρώνεται στο επίπεδο CE2



Εικόνα 20: $P_{RACH,F,(1 \rightarrow 2)}$

3.1.6 D.2.Υπόθεση 3a: Η συσκευή ξεκινά την αρχική προσπάθεια σε επίπεδο CE2



Εικόνα 21: $P_{RACH,F,(2 \rightarrow 2)}$

Αναφορές

1. "Aloha protocol." Encyclopedia Britannica, <https://www.britannica.com/technology/Aloha-protocol>. Accessed 5 Mar. 2023.
2. "Slotted ALOHA Protocol." Tutorialspoint, https://www.tutorialspoint.com/data_communication_computer_network/slotted_aloha_protocol.htm. Accessed 5 Mar. 2023.
3. "LTE Random Access Procedure." 4G LTE, <https://4gltemobilebroadband.wordpress.com/2015/03/06/lte-random-access-procedure/>. Accessed 5 Mar. 2023.
4. "LTE Random Access Procedure." 3GLTEInfo, <https://www.3glteinfo.com/lte-random-access-procedure/>. Accessed 5 Mar. 2023.
5. "3GPP Specification." 3rd Generation Partnership Project, https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/36_series/36.321/36321-a20.zip. Accessed 5 Mar. 2023.
6. "LTE RACH Process." Electronics Notes, <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/lte/lte-random-access-rach.php>. Accessed 5 Mar. 2023.
7. 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network, "Narrowband IoT (NB-IoT)," 3GPP TS 36.300, September 2019.
8. J. P. Vilchez, M. A. Vega-Rodriguez, and J. Rabadan, "Random Access Procedure in Narrowband IoT Networks," IEEE Access, vol. 8, pp. 175523-175538, September 2020.
9. S. T. W. Chan and Z. Chen, "NB-IoT: From Physical Layer to Application," IEEE Internet of Things Journal, vol. 7, no. 5, pp. 3815-3826, May 2020.
10. J. S. M. Ebert and T. G. Thomas, "Performance Evaluation of Narrowband IoT Random Access Procedure under Different Deployment Scenarios," in Proceedings of the 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), Bologna, Italy, September 2019, pp. 745-749.
11. M. Al-Shalash and M. Kadoch, "NB-IoT Random Access Procedure: A Comprehensive Survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 23, no. 2, pp. 706-732, Second Quarter 2021.
12. T. Wang, Q. Li, X. Li, J. Li, and Z. Yang, "Joint Power and Channel Allocation in NOMA-enabled D2D Communication Networks," IEEE Transactions on Communications, vol. 68, no. 11, pp. 6819-6833, Nov. 2020.
13. H. S. Al-Raweshidy, "Performance of CDMA Mobile Radio Systems with Adaptive Coherent Multiuser Detection in Fading Channels," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 46, no. 1, pp. 29-42, Feb. 1997.
14. S. Srinivasan and V. Bhargava, "Adaptive codebook optimization for improving link quality in multiuser MIMO systems," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 13, no. 5, pp. 2479-2492, May 2014.

15. M. Vaezi, M. Sharif, and B. M. Sadeghi, "Enhancing WLAN performance via adaptive carrier sensing threshold," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 2, pp. 762-771, Feb. 2012.
16. S. Sun, L. Zhang, Y. Cui, and Z. Yang, "Optimized adaptive coding and modulation for satellite communications," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 53, no. 4, pp. 1724-1739, Aug. 2017.
17. 3GPP TS 36.213 subclause 6.1 - "Physical layer procedures for control" (Release 15, 2018) - https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.213/36113-f40.zip
18. 3GPP TS 36.321 subclause 7.6 - "Medium Access Control (MAC) protocol specification" (Release 15, 2018) - https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.321/36321-f30.zip
19. 3GPP TS 36.331 - "Radio Resource Control (RRC); Protocol specification" (Release 15, 2018) - https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.331/36331-f50.zip
20. 3GPP TS 36.101 - "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception" (Release 15, 2018) - https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.101/36101-a40.zip
21. MATLAB. (n.d.). Retrieved from <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
22. Chen, J., Liao, Z., Sun, Q., & Xu, Y. (2018). Joint scheduling and power control for machine type communications with non-orthogonal multiple access in LTE-A networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018, 1-12. doi: 10.1155/2018/4027396
23. Fan, Y., Ma, L., Wang, W., Li, Y., Li, B., & Li, H. (2019). Improved downlink NOMA in high-mobility wireless networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 15(8), 155014771986239. doi: 10.1177/1550147719862392
24. Rappaport, T. S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K.,... & Schulz, J. K. (2013). Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!. *IEEE Access*, 1, 335-349. doi: 10.1109/access.2013.2260813
25. 3GPP. (2020). TS 36.213: LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures. Retrieved from https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.213/

Παράρτημα

```
N = 1e4;
p = linspace(0,1);
Na = linspace(1, 1e4);
Nb = linspace(1, 6e3);
Nc = linspace(1, 3e3);
p0 = @(Na, N) (Na/N);
p1 = @(Nb, N) (Nb/N);
p2 = @(Nc, N) (Nc/N);
a = @(p, Na) (1-(1-p/12).^(Na-1));
a_v = a(p,Na);
p0_v = p0(Na,N);
p1_v = p1(Nb,N);
p2_v = p2(Nc,N);

PF1a = @(p0,a) (a.*(1-(1-a).*p0).^9);
PF1a_v= PF1a(p0_v, a_v);
plot(p0_v,PF1a_v, 'k-', 'linewidth', 2)
xlabel('$p_0(N_a, \ N)$', 'Interpreter','latex')
ylabel('$PF1a(p_0, \ a)$', 'Interpreter','latex')
grid on
ylim([0.1 0.1])
xlim([0.0* 0.5 0.1])

Nab=(Na+Nb);
p01=@(Nab,N) (Nab/N);
p01_v=p01(Nab,N);
b = @(p, Nb) (1-(1-p/12).^(Na-1));
b_v = b(p,Nb);
PF1b= @(p01,b) (PF1a_v.*(1-(1-b).*p01).^20);
PF1b_v= PF1b(p01_v, b_v);
plot(p01_v,PF1b_v, 'k-', 'linewidth', 2)
xlabel('$p_01(N_a+N_b, \ N)$', 'Interpreter','latex')
ylabel('$PF1b(p_01, \ b)$', 'Interpreter','latex')
grid on
ylim([0.1 0.1])
xlim([0.0* 0.5 0.18])

c = @(p, Nc) (1-(1-p/24).^(Na-1));
c_v = c(p,Nc);
PF1c= @(p2,c) (PF1b_v.*c.^50);
PF1c_v = PF1c(p2_v,c_v);
plot(p2_v,PF1c_v, 'k-', 'linewidth', 2)
xlabel('$p_2(N_c, \ N)$', 'Interpreter','latex')
ylabel('$PF1c(p_2, \ c)$', 'Interpreter','latex')
grid on
ylim([0.1 0.1])
xlim([0.0* 0.01 0.06])

PF2a= @(p1,b) (b.*(1-(1-b).*p1).^19);
PF2a_v = PF2a(p1_v,b_v);
plot(p1_v,PF2a_v, 'k-', 'linewidth', 2)
xlabel('$p_1(N_b, \ N)$', 'Interpreter','latex')
```

```

ylabel('$PF2a(p_1, \ b)$', 'Interpreter','latex')
grid on
ylim([0.1 0.1])
xlim([0.0* 0.01 0.08])

Nbc=(Nb+Nc);
p12= @(Nbc,N) (Nbc/N);
p12_v=p12(Nbc,N);
PF2b= @(p12,c) (PF2a_v.*(1-(1-c).*p12).^50);
PF2b_v= PF2b(p12_v,c_v);
plot(p12_v,PF2b_v, 'k-', 'linewidth', 2)
xlabel('$p_{12}(N_b+N_c, \ N)$', 'Interpreter','latex')
ylabel('$PF2b(p_{12}, \ c)$', 'Interpreter','latex')
grid on
ylim([0.1 0.1])
xlim([0.0* 0.01 0.12])

PF3a=@(p2,c) (c.*(1-(1-c).*p2).^49)
PF3a_v = PF3a(p2_v,c_v);
plot(p2_v,PF3a_v, 'k-', 'linewidth', 2)
xlabel('$p_2(N_c, \ N)$', 'Interpreter','latex')
ylabel('$PF3a(p_2, \ c)$', 'Interpreter','latex')
grid on
ylim([0.1 0.1])
xlim([0.0* 0.01 0.04])

```