



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη της επίδρασης της πλαισίωσης και του ρυθμού κωδικοποίησης στην απόδοση δικτύων LTE αμφίδρομης λειτουργίας διαίρεσης χρόνου

Λάζαρος Μπατσίλας (ΑΜ 181)

Επιβλέπων: Σαρηγιαννίδης Παναγιώτης

Κοζάνη,

Φεβρουάριος 2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
2. ABSTRACT	4
3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	5
3.1 Γενικά	5
3.1.1 LTE και ιστορική εξέλιξη της κινητής τηλεφωνίας.....	5
3.1.2 Χαρακτηριστικά και ονομαστικές τιμές του LTE.....	8
3.2 Αρχιτεκτονική του LTE	10
3.2.1 Δίκτυο Κορμού.....	12
3.2.2 Δίκτυο Πρόσβασης.....	14
3.2.3 Διαστρωματωμένη αρχιτεκτονική στο LTE.....	16
3.2.4 Ανοδικά και καθοδικά κανάλια στο LTE.....	18
3.3 MAC επίπεδο στο LTE	21
3.3.1 HARQ διεργασίες.....	21
3.3.2 Επεξεργασία δεδομένων στο επίπεδο MAC.....	23
3.4 Φυσικό επίπεδο στο LTE	27
3.4.1 Το πλέγμα πόρων για το LTE.....	27
3.4.2 Καθοδικά σήματα αναφοράς.....	29
3.4.3 Ανοδικά σήματα αναφοράς.....	30
3.4.4 Κωδικοποίηση και διαμόρφωση καθοδικών δεδομένων.....	32
3.4.5 Ορθογωνική Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας	34
3.4.6 OFDMA.....	35
3.4.7 SC-OFDMA.....	37
3.4.8 Αμφίδρομη λειτουργία στο LTE.....	38
3.4.9 Λειτουργία TDD στο LTE.....	40
4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	43
5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ	46

5.1 Δημιουργία Μοντέλου.....	46
5.2 Εύρεση βέλτιστου σημείου λειτουργίας.....	50
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	52
6.1 Εκτέλεση βασικού μοντέλου.....	52
6.2 Εύρεση βέλτιστου σημείου λειτουργίας.....	71
6.3 Εφαρμογή σε δεδομένα πραγματικής κίνησης.....	82
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	89
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	97

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το LTE έχει γίνει το de facto πρότυπο για τις κινητές επικοινωνίες. Σε αυτό έχουν συντελέσει ένας αριθμός από πλεονεκτήματα που περιλαμβάνουν την άριστη αξιοποίηση φάσματος, μία αποκεντρωμένη και ευέλικτη αρχιτεκτονική, κλιμακωσιμότητα και συμβατότητα με προγενέστερες τεχνολογίες. Η διείσδυση του LTE συνεχώς αυξάνει και αναμένεται ότι θα καλύπτει το 70% της ολικής κίνησης το 2020.

Το LTE προβλέπει την προσαρμοστική κωδικοποίηση και διαμόρφωση (ACM) και την αμφίδρομη λειτουργία διαίρεσης χρόνου (TDD). Καθώς μεταβάλλονται οι συνθήκες του καναλιού, ο ρυθμός κωδικοποίησης μεταβάλλεται. Όταν οι συνθήκες είναι άσχημες, είναι επωφελές να χρησιμοποιηθεί ένας χαμηλός ρυθμός, ώστε να μπορεί να γίνει επιτυχώς η ανάκτηση των δεδομένων από τον παράληπτη. Αντίθετα, σε καλές συνθήκες είναι προτιμότερος ένας υψηλός ρυθμός κωδικοποίησης, καθώς επιτρέπει μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης χρήσιμων δεδομένων.

Η λειτουργία TDD αποτελεί επίσης μία τεχνική που προσφέρει πλεονέκτηματα, ειδικά στις μέρες μας όπου η χρήση των κινητών τηλεφώνων περιλαμβάνει την εκτέλεση εφαρμογών ή/και τη μεταφορά αρχείων πολυμέσων. Μέσω της λειτουργίας TDD μπορεί το δίκτυο να προσαρμοστεί σε ασύμμετρη κίνηση. Ωστόσο, η λειτουργία TDD έχει τύχει πολύ λιγότερης προσοχής από ότι η FDD στην επιστημονική βιβλιογραφία.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένα μοντέλο της επικοινωνίας μεταξύ χρηστών και δικτύου LTE, δίνοντας βαρύτητα τόσο στην ACM όσο και τη λειτουργία TDD. Βάσει αυτού, εξάγονται μία σειρά από μετρικές που περιλαμβάνουν τη ρυθμαπόδοση, την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, το μέσο πλήθος μεταδόσεων και το λόγο απόρριψης πακέτων.

Επιπλέον, προτείνεται μία μέθοδος δυναμικής επιλογής της βέλτιστης λειτουργίας για διαφορετικές συνθήκες δικτύου. Εξετάζεται η απόδοση αυτής της πρακτικής τόσο σε δεδομένα που παράγονται με τυχαίο τρόπο, όσο και σε πραγματικά δεδομένα.

ABSTRACT

LTE has emerged as the de facto standard for mobile communication. The reasons behind this include the very efficient use of available spectrum, a decentralized and flexible architecture, scalability and compatibility with previous networks. Penetration of LTE technologies is steadily increasing. It is expected that by 2020, 70% of global traffic will be covered by LTE networks.

Two features included in the LTE specifications are adaptive coding and modulation (ACM) and time-division duplexing (TDD) operation. ACM refers to choosing different coding rates and physical modulations with varying channel conditions. When conditions are bad, low coding rates are preferable, since they facilitate decoding and demodulation on the receiving side based on redundant information in the signal. On the other hand, when conditions are good, high coding rates are preferred because they enable the transmission of larger quantities of useful data.

TDD operation is another LTE feature which offers advantages that are especially relevant today, when cell-phone use often involves running applications and/or downloading multimedia. TDD seems an attractive option for these cases, since it can adjust to asymmetric uplink/downlink traffic. However, it has received considerable less attention than FDD in the scientific literature.

The work presented here involves modeling the uplink/downlink communication between users and an LTE network, focusing both on ACM and TDD operation. A number of performance metrics is calculated which include throughput, end to end delay, mean number of transmissions/retransmissions and packet drop ratio.

In addition, we investigate a methodology to dynamically select the optimum operating point with varying network conditions. We evaluate the validity of this approach both on randomly generated data and on traffic traces extracted from real-life communication examples.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 Γενικά

3.1.1 LTE και ιστορική εξέλιξη της κινητής τηλεφωνίας

Το LTE αποτελεί μία σειρά βιομηχανικών προτύπων που καθορίζουν τις τεχνικές λεπτομέρειες των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στην κινητή τηλεφωνία, ώστε να εξασφαλίζεται η συμβατότητα και να υποστηρίζεται η καινοτομία και η τεχνολογική ανάπτυξη. Ο ορισμός αυτών των προτύπων έγινε υπό την αιγίδα του σχεδίου σύμπραξης τρίτης γενιάς (Third Generation Partnership Project, 3GPP) με στόχο την εξέλιξη των προτύπων που είχαν ήδη οριστεί για τα συστήματα τρίτης γενιάς (3G) και συγκεκριμένα των GSM/EDGE και UMTS/HSPA.

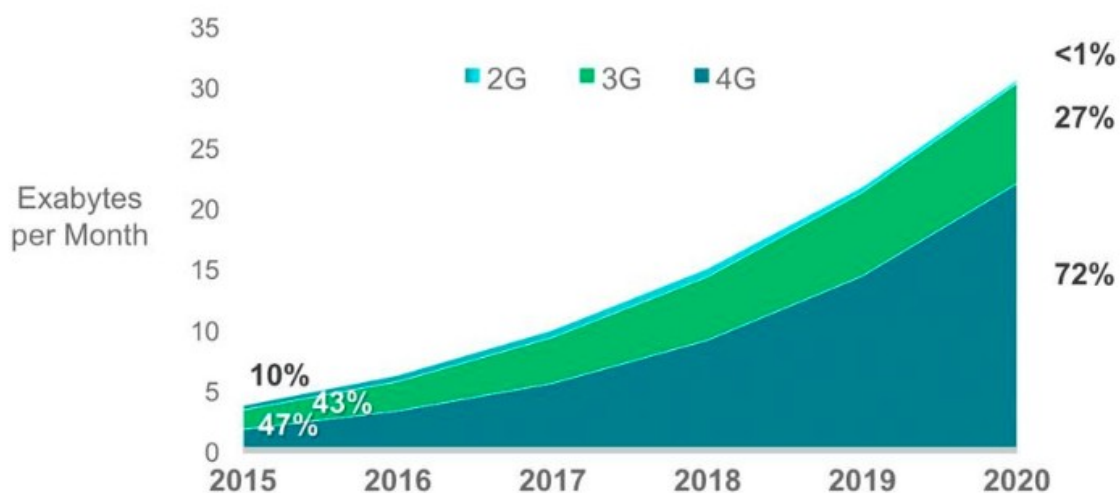
Ανάμεσα στους λόγους που κατέστησαν απαραίτητη την εξέλιξη των τρέχοντων προτύπων και τον ορισμό των προτύπων για το LTE συγκαταλέγονται:

- Η ανάγκη για συνέχεια και για ανταγωνιστικότητα των συστημάτων τρίτης γενιάς (3G) στο άμεσο και στο απώτερο μέλλον.
- Οι αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών για υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και για εξασφαλισμένες ποιότητες υπηρεσίας (QoS).
- Η βελτιστοποίηση των συστημάτων μεταγωγής πακέτου.
- Η συνεχόμενη απαίτηση για μείωση του κόστους.
- Η ελάττωση της πολυπλοκότητας.
- Η αποτροπή του τεχνολογικού κατακερματισμού λόγω της λειτουργίας με χρήση ή όχι συζευγμένου εύρους ζώνης (paired or unpaired band).

Η πρώτη εκδοχή του LTE ολοκληρώθηκε με τη δημοσίευση της έκδοσης 8 (Release 8) του 3GPP το Δεκέμβριο του 2008, ενώ η πρώτη εμπορική εφαρμογή στηριζόμενη σε αυτό έλαβε χώρα ένα χρόνο μετά. Το σύνολο προτύπων που περιλαμβάνονται

στην έκδοση 10 (Release 10) είναι γνωστό ως “προηγμένο LTE” (LTE advanced). Η τρέχουσα έκδοση που έχει οριστικοποιηθεί είναι η έκδοση 12 (frozen state), ενώ είναι ανοιχτές οι εκδόσεις 13 και 14. Η διείσδυσή του είναι μεγάλη και αναμένεται να είναι ακόμη σημαντικότερη στο μέλλον (Σχήμα 3.1).

Στο σχήμα 3.2 φαίνεται η εξέλιξη των τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας η οποία είναι χωρισμένη σε “γενιές”. Η πρώτη γενιά αφορά στις αναλογικές τεχνολογίες οι οποίες έχουν εγκαταλειφθεί στις μέρες μας. Η δεύτερη γενιά σηματοδοτεί τη στροφή της τεχνολογίας σε ψηφιακές τεχνικές και αποτέλεσε μία σημαντική καμπή στο πεδίο. Ωστόσο, η περίοδος αυτή σημαδεύτηκε από την εισαγωγή πολλών προτύπων ασύμβατων μεταξύ τους. Από αυτά μόνο δύο έχουν επιβιώσει στις μέρες μας: το GSM και το IS-95A CDMA. Η τρίτη γενιά κινητής τηλεφωνίας χαρακτηρίζεται επίσης από κατακερματισμό των χρησιμοποιούμενων τεχνολογιών. Οι δύο σημαντικότερες

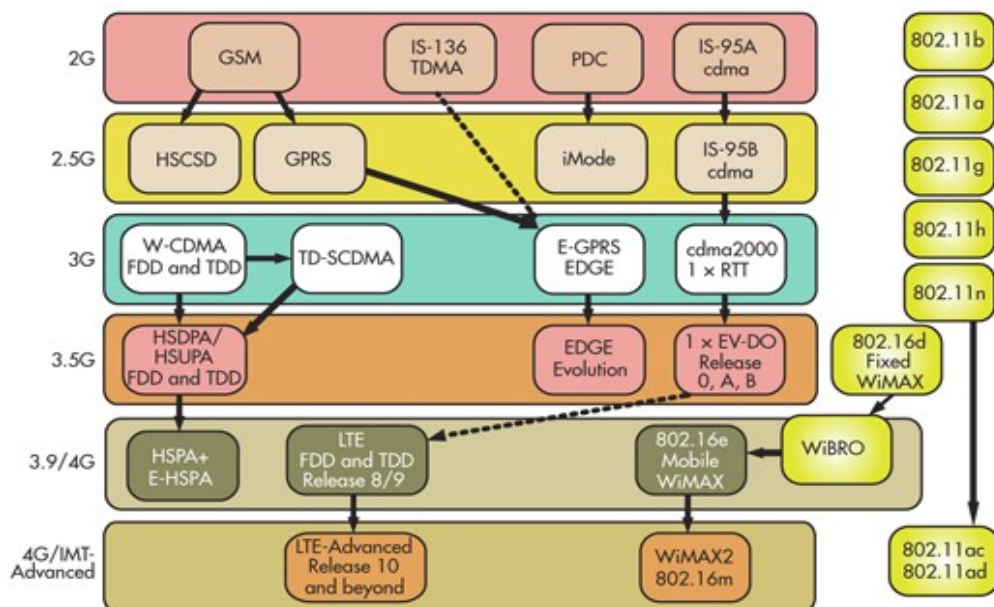


Source: Cisco VNI Mobile, 2016

Σχήμα 3.1: Συνολική κίνηση κινητής τηλεφωνίας ανά γενιά.

από αυτές (σε χρήση ακόμη και σήμερα) είναι το WCDMA και το CDMA2000. Τα δύο αυτά πρότυπα συνεχίσαν να εξελίσσονται και οδήγησαν στον ορισμό των HSPA και 1xRTT EV-DO αντίστοιχα. Τα πρότυπα αυτά θεωρούνται ότι ανήκουν στην “3.5 γενιά” (3.5 G).

Το LTE αναπτύχθηκε ως η επόμενη γενιά προτύπων και έγινε αποδεκτό από τις σημαντικότερες εταιρίες κινητής τηλεφωνίας με βάση τα πλεονεκτήματά του. Καθώς το 3GPP προχώρησε ανεξάρτητα από την εξέλιξη του LTE στον καθορισμό των κριτηρίων για να μπορεί να ενταχθεί μία τεχνολογία στην 4η γενιά, οι πρώτες εκδόσεις του LTE εντάχθηκαν στην 3.9 γενιά προτύπων. Με τη δημοσίευση της έκδοσης 10 (Release 10) από το 3GPP το LTE εντάχθηκε στην 4η γενιά και είναι γνωστό ως “προηγμένο LTE” (LTE Advanced ή LTE-A).



Σχήμα 3.2: Εξέλιξη προτύπων κινητής τηλεφωνίας.

3.1.2 Χαρακτηριστικά και ονομαστικές τιμές του LTE

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται τα χαρακτηριστικά και οι ονομαστικές τιμές των βασικών παραμέτρων του LTE κατά την πρώτη δημοσίευση του προτύπου (Release 8) το Δεκέμβριο του 2008. Στη συνέχεια, αναφέρονται οι λειτουργίες και βελτιώσεις που έγιναν διαθέσιμες με τη δημοσίευση των επόμενων εκδόσεων ως τη δημοσίευση της έκδοσης 10, που σηματοδότησε την εισαγωγή του προηγμένου LTE (LTE Advanced).

Τα κύρια χαρακτηριστικά που προβλεπόταν στη βασική έκδοση του LTE (Release 8) περιλαμβάνουν:

- Υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Το πρότυπο προβλέπει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης 300 Mbps για καθοδική κίνηση και 75 Mbps για ανοδική κίνηση. Οι τιμές αυτές είναι εφικτές με τη χρήση του μέγιστου προβλεπόμενου εύρους ζώνης (20 MHz) και την αξιοποίηση 4 x 4 MIMO μετάδοσης.
- Πολύ αποτελεσματική αξιοποίηση του εύρους ζώνης.
- Ευελιξία στη χρήση εύρους ζώνης. Συγκεκριμένα, οι ακόλουθες τιμές για το εύρος ζώνης υποστηρίζονται από το πρότυπο: 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 15 MHz και 20 MHz.
- Μικρό χρόνο αποστολής-λήψης. Σε ιδανικές συνθήκες μετάδοσης ο χρόνος απόκρισης (latency) είναι μικρότερος από 5 ms.
- Απλοποιημένη αρχιτεκτονική και αποκεντρωμένη σχεδίαση.
- Χρήση OFDMA για καθοδική κίνηση και SC-FDMA για ανοδική.
- Χρήση του πρωτοκόλλου IP σε ολόκληρο το δίκτυο.
- Αξιοποίηση πολλαπλών κεραιών για μετάδοση πολλαπλών εισόδων-πολλαπλών εξόδων (Multiple in-Multiple out, MIMO)
- Χρήση συζευγμένου (paired) και μη συζευγμένου (unpaired) φάσματος. Λειτουργία πλήρους αμφίδρομης μετάδοσης με τη χρήση διαίρεσης συχνότητας (FDD) ή διαίρεσης χρόνου (TDD).

Με την ενσωμάτωση των παρακάτω χαρακτηριστικών και βελτιώσεων δημιουργήθηκε ένα σύνολο προτύπων που είναι γνωστό ως "Προηγμένο LTE". Το πρότυπο αυτό θεωρείται ένα πραγματικό πρότυπο τέταρτης γενιάς και οριστικοποιήθηκε με την δημοσίευση της έκδοσης 10 το Μάρτιο του 2011. Στα βασικά του χαρακτηριστικά περιλαμβάνονται:

- Ακόμη υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης: 1 Gbps για καθοδική μετάδοση και 500 Mbps για ανοδική.
- Ακόμη καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος.
- Παγκόσμια περιαγωγή (roaming).
- Μεγαλύτερες δυνατότητες πολλαπλής πρόσβασης κατά την ανοδική κίνηση. Το LTE-A προβλέπει τη σύμπτυξη υπο-φέροντων SC-FDMA σε μη συνεχών τμημάτων φάσματος και τον προγραμματισμό επιλογής συχνότητας (frequency-selective scheduling) στην καθοδική κίνηση.
- Το LTE-A προσφέρει μεγαλύτερες δυνατότητες MIMO τεχνικών επιτρέποντας τη χρήση 8x8 MIMO μετάδοσης για την καθοδική κίνηση και 4x4 μετάδοση για την ανοδική.
- Ενδιάμεσοι κόμβοι (Relay Nodes). Οι κόμβοι αυτοί αποτελούν κόμβους χαμηλής ισχύος που διευρύνουν την κάλυψη των συμβατικών eNodeB κόμβων σε περιβάλλοντα χαμηλής κάλυψης.
- Βελτιωμένο συντονισμό διακυψελικής παρεμβολής (enhanced inter-cell interference coordination, eICIC). Η χρήση αυτής της τεχνικής ελαττώνει την παρεμβολή τόσο στα κανάλια δεδομένων όσο και στα κανάλια ελέγχου σε ετερογενή συστήματα αξιοποιώντας διαφορές στην ισχύ, το πεδίο της συχνότητας και το πεδίο του χρόνου.
- Σύμπτυξη φορέων (Carrier Aggregation, CA). Η σύμπτυξη φορέων εισήχθη στο LTE-A ως ένας οικονομικός τρόπος χρήσης κατακερματισμένου φάσματος στην ίδια ή σε διαφορετικές ζώνες φάσματος. Μεγαλύτεροι ρυθμοί μετάδοσης για το χρήστη επιτυγχάνονται με την αποστολή δεδομένων σε περισσότερους από έναν φορείς. Το LTE-A προβλέπει την αξιοποίηση μέχρι 100 MHz μη

συνεχούς εύρους ζώνης που προέρχεται από τη συνένωση μέχρι πέντε ανεξάρτητων φορέων με εύρος ζώνης 20 MHz.

- Υποστήριξη για ετερογενή δίκτυα. Το πρότυπο LTE-A περιγράφει τις τεχνικές προδιαγραφές για τη λειτουργία ετερογενών δικτύων που περιλαμβάνουν το συνδυασμό μεγάλων μακρο-κελιών με μικρότερα κελιά.
- Αυτο-οργανωνόμενα δίκτυα (self-organizing networks SON). Το LTE-A περιλαμβάνει μία σειρά από βελτιώσεις σε SON χαρακτηριστικά στα οποία συμπεριλαμβάνονται και διεργασίες αυτοανάκτησης και επαναφοράς.

3.2 Αρχιτεκτονική του LTE

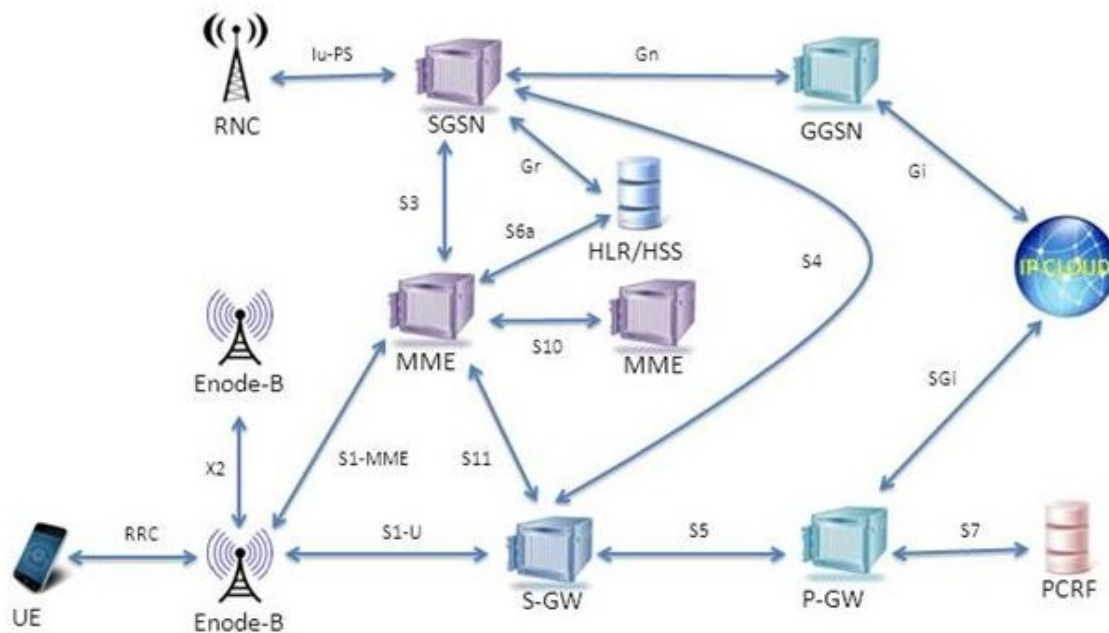
Σε αντίθεση με τα προγενέστερα συστήματα κινητής τηλεφωνίας που στηριζόταν σε μετάδοση μεταγωγής κυκλώματος, το LTE είναι σχεδιασμένο ώστε να υποστηρίζει μόνο υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων. Ο στόχος είναι η διαφανής συνδεσιμότητα IP μεταξύ του εξοπλισμού του χρήστη (User Equipment, UE) και του δικτύου πακέτων δεδομένων (packet data network, PDN). Η υπηρεσία αυτή θα πρέπει να είναι αδιάληπτη παρά την κινητικότητα των χρηστών.

Για κάθε σύνδεση μεταξύ του εξοπλισμού χρήστη και της πύλης (gateway) του PDN που αποτελεί την πύλη προς το διαδίκτυο για το χρήστη, εγκαθίσταται ένας λογικός φορέας εξελιγμένου συστήματος πακέτου (Evolved Packet System/EPS bearer). Κάθε τέτοιος φορέας αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας ανάμεσα στην πύλη και τον εξοπλισμό χρήστη. Οι φορείς EPS εγκαθίστανται και ελευθερώνονται ανάλογα με τις αιτούμενες εφαρμογές και υπηρεσίες.

Οι φορείς EPS εξασφαλίζουν συνδεσιμότητα IP με ένα PDN για πρόσβαση στο ίντερνετ καθώς επίσης και για υπηρεσίες VoIP. Για τον ίδιο χρήστη μπορούν να εγκατασταθούν πολλαπλοί φορείς EPS για τη σύνδεση σε διαφορετικά PDNs ή για διαφορετικές ποιότητες υπηρεσίας (QoS), Ένας χρήστης, για παράδειγμα, μπορεί να

συνομιλεί με κάποιον χρησιμοποιώντας VoIP, ενώ παράλληλα να κατεβάζει ένα αρχείο χρησιμοποιώντας FTP. Οι δύο αυτές υπηρεσίες έχουν τυπικά διαφορετικές ποιότητες υπηρεσίας και επομένως απαιτούν την εγκαθίδρυση δύο διαφορετικών φορέων EPS.

Αυτό επιτυγχάνεται από τη σύνθεση διαφορετικών οντοτήτων που επιτελούν διαφορετικούς ρόλους (Σχήμα 3.3) [1], [2]. Η συνεργασία μεταξύ των οντοτήτων λαμβάνει χώρα μέσω λεπτομερώς καθορισμένων διεπαφών. Μία πρώτη διάκριση μπορεί να γίνει ανάμεσα στις οντότητες που συγκροτούν το δίκτυο κορμού (core network, CN) και σε αυτές που συγκροτούν το E-UTRAN. Το δεύτερο αυτό κομμάτι του δικτύου περιλαμβάνει ουσιαστικά μόνο κόμβους eNodeB (καθώς και τις διεπαφές που τους συνδέουν μεταξύ τους, με τον εξοπλισμό χρήστη και με το δίκτυο κορμού). Η χρήση σαφώς καθορισμένων διεπαφών επιτρέπει το συνδυασμό εξοπλισμού από διαφορετικούς προμηθευτές και προωθεί την εξέλιξη της τεχνολογίας.



Σχήμα 3.3: Αρχιτεκτονική του LTE.

3.2.1 Δίκτυο Κορμού

Το δίκτυο κορμού (ή Evolved Packet Core - EPC) είναι υπεύθυνο για τις λειτουργίες ελέγχου για τον εξοπλισμό χρήστη και για την εγκαθίδρυση των EPS φορέων. Οι κύριοι κόμβοι είναι (Σχήμα 3.3):

- Πύλη προς PDN (P-GW)
- Πύλη υπηρεσίας (S-GW)
- Οντότητα Διαχείρισης Κινητικότητας (Mobility Management Entity-MME)

Επιπλέον το EPC περιλαμβάνει τους ακόλουθους λογικούς κόμβους και λειτουργίες:

Λειτουργία ελέγχου πολιτικής και κανόνων χρέωσης (policy control and charging rules function - PCRF). Η λειτουργία αυτή είναι υπεύθυνη για τη λήψη αποφάσεων που έχουν να κάνουν με την εφάρμογη της εκάστοτε πολιτικής καθώς και με τον έλεγχο της χρέωσης που στηρίζεται στη ροή δεδομένων σε συνδυασμό με τη λειτουργία ελέγχου επιβολής πολιτικής που βρίσκεται στη P-GW. Η PCRF επιτρέπει επίσης την εξουσιοδότηση ποιότητας υπηρεσίας που καθορίζει το ρυθμό μετάδοσης και την κλάση της κίνησης σε συμφωνία με το προφίλ του χρήστη.

Εξυπηρετητής οικείου συνδρομητή (home subscriber server HSS). Ο HSS περιέχει τα δεδομένα του εκάστοτε συνδρομητή, όπως το προφίλ της ποιότητας υπηρεσίας καθώς επίσης και ενδεχόμενους περιορισμούς περιήγησης. Επιπλέον, περιέχει πληροφορίες σχετικά με το PDN ή τα PDN στα οποία ο χρήστης έχει την εξουσιοδότηση να συνδεθεί. Ο HSS περιέχει επίσης δυναμικές πληροφορίες όπως η ταυτότητα της MME στην οποία έχει προσδεθεί ή καταχωρηθεί ο χρήστης. Τέλος, ο HSS μπορεί να εμπεριέχει το κέντρο πιστοποίησης (AUC) που παράγει τα ψηφιακά κλειδιά για πιστοποίηση και ασφάλεια.

Πύλη προς το δίκτυο πακέτων δεδομένων (PDN-GW, P-GW). Η P-GW είναι υπεύθυνη για την απόδοση διεύθυνσης IP στον εξοπλισμό χρήστη καθώς επίσης και

για την εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας και του καθορισμού της χρέωσης σύμφωνα με τους κανόνες από την PCRF. Είναι επίσης υπεύθυνη για την ανάθεση των καθοδικών πακέτων χρήστη σε διαφορετικούς φορείς ποιότητας υπηρεσίας. Η P-GW επιβάλλει την ποιότητα υπηρεσίας για φορείς εξασφαλισμένου ρυθμού μετάδοσης (guaranteed bit rate bearers, GBR bearers). Τέλος, αποτελεί το σημείο πρόσδεσης με δίκτυα που δεν υιοθετούν τις προδιαγραφές του 3GPP όπως CDMA2000 και WiMAX δίκτυα.

Πύλη υπηρεσίας (Service Gateway, S-GW). Από αυτή διέρχονται όλα τα IP πακέτα χρήστη και αποτελεί το σημείο πρόσδεσης τοπικής κινητικότητας καθώς ο εξοπλισμός χρήστη μετακινείται από έναν eNodeB κόμβο στο γειτονικό του. Επίσης, διατηρεί πληροφορίες για τους φορείς δεδομένων, όσο ο εξοπλισμός χρήστη είναι σε κατάσταση αδράνειας και αποθηκεύει προσωρινά τα δεδομένα καθοδικής κίνησης όσο η MME εκκινεί τη διαδικασία paging για να γίνει η επανεγκατάσταση των φορέων EPS. Επιπλέον, η S-GW επιτελεί διαχειριστικές λειτουργίες στο δίκτυο, όπως η συλλογή πληροφοριών χρέωσης (για παράδειγμα ο όγκος δεδομένων που έλαβε ή έστειλε ο χρήστης) και η νόμιμη παρεμβολή. Τέλος, αποτελεί το σημείο πρόσδεσης για την αλληλεπίδραση με δίκτυα παλιότερης τεχνολογίας του 3GPP, όπως δίκτυα GPRS και UMTS.

Οντότητα διαχείρισης κινητικότητας (Mobility management entity, MME). Η MME αποτελεί τον κόμβο ελέγχου που επεξεργάζεται τη σηματοδότηση μεταξύ του εξοπλισμού χρήστη και του δικτύου κορμού. Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για αυτό είναι γνωστά ως πρωτόκολλα στρώματος μη-πρόσβασης (Non access stratum/NAS protocols). Οι λειτουργίες που επιτελεί η MME μπορούν να διακριθούν σε λειτουργίες που έχουν να κάνουν με τη διαχείριση των φορέων και σε λειτουργίες που έχουν να κάνουν με τη διαχείριση της σύνδεσης. Στην πρώτη κατηγορία συγκαταλέγονται η ίδρυση, η συντήρηση και η απελευθέρωση των φορέων EPS. Τις λειτουργίες αυτές τις αναλαμβάνει το στρώμα διαχείρισης συνόδου των NAS πρωτοκόλλων. Στις λειτουργίες διαχείρισης σύνδεσης περιλαμβάνονται η εγκαθίδρυση της σύνδεσης και η ασφάλεια μεταξύ του χρήστη και του δικτύου που

επιτελούνται από το στρώμα σύνδεσης ή διαχείρισης κινητικότητας των NAS πρωτοκόλλων.

3.2.2 Δίκτυο Πρόσβασης

Το δίκτυο πρόσβασης του LTE είναι γνωστό ως E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network) και αποτελείται από ένα δίκτυο από κόμβους του ίδιου τύπου που ονομάζονται eNodeB. Στην περίπτωση κανονικής (όχι broadcast) κίνησης, δεν υπάρχει κεντρικός έλεγχος, καθώς όλοι οι κόμβοι είναι ισότιμοι, ακολουθεί δηλαδή μία επίπεδη αρχιτεκτονική.

Οι κόμβοι eNodeB συνδέονται μεταξύ τους μέσω των διεπαφών "X2" και στο EPC μέσω των διεπαφών "S1". Συγκεκριμένα, υπάρχουν δύο τύποι διεπαφών "S1": η S1-MME που συνδέει eNodeB κόμβους με την MME και η S1-U που συνδέει eNodeB κόμβους με την S-GW. Οι eNodeB κόμβοι επικοινωνούν άμεσα με τον εξοπλισμό του χρήστη μέσω πρωτοκόλλων που είναι συνολικά γνωστά ως πρωτόκολλα "AS" (πρωτόκολλα στρώματος πρόσβασης, access stratum protocols).

Το E-UTRAN είναι υπεύθυνο για όλες τις λειτουργίες που σχετίζονται με τη μετάδοση και οι οποίες περιλαμβάνουν τα εξής:

- Διαχείριση πόρων ραδιοσυχνοτήτων (Radio resource management, RRM). Αυτή περιλαμβάνει όλες τις λειτουργίες που έχουν να κάνουν με τους φορείς (radio bearers), όπως έλεγχος φορέων, έλεγχος πρόσβασης, έλεγχος κινητικότητας, προγραμματισμός και δυναμική απόδοση πόρων στον εξοπλισμό χρήστη, τόσο για καθοδική όσο και για ανοδική κίνηση.
- Συμπύεση κεφαλίδων (header compression). Αυτή η λειτουργία συμβάλλει στην αποδοτική χρήση της διεπαφής ραδιοσυχνοτήτων με τη συμπύεση των κεφαλίδων πακέτων IP. Με την τεχνική αυτή είναι δυνατή η σημαντική εξάλειψη των overheads στη μετάδοση, ιδιαίτερα στην περίπτωση κατά την

οποία τα πακέτα είναι μικρά. Μια τέτοια τυπική περίπτωση είναι η περίπτωση των συνομιλιών μέσω VoIP.

- Ασφάλεια. Η ασφάλεια στο δίκτυο πρόσβασης επιτυγχάνεται με την επιβολή της κρυπτογραφημένης επικοινωνίας σε όλες τις διεπαφές.
- Συνδεσιμότητα με το EPC. Αυτή περιλαμβάνει τόσο τη σηματοδότηση προς την MME, όσο και με την S-GW.

Στην πλευρά του δικτύου, όλες αυτές οι λειτουργίες εντοπίζονται στους eNodeB κόμβους, καθένας από τους οποίους μπορεί να είναι υπεύθυνος για περισσότερες από μία κυψελίδες. Μία από τις σημαντικότερες διαφορές του LTE από τα προγενέστερα πρότυπα είναι η μεταφορά των λειτουργιών ελέγχου στους κόμβους eNodeB. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται πολύ στενή αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών στρωμάτων πρωτοκόλλων στο δίκτυο, έχοντας ως αποτέλεσμα την ελάττωση της καθυστέρησης και τη βελτιωμένη απόδοση. Μέσω ενός τέτοιου αποκεντρωμένου ελέγχου δεν υπάρχει πλέον η ανάγκη για έναν ελεγκτή ο οποίος θα είναι διαρκώς απασχολημένος με υπολογιστικά απαιτητικές διαδικασίες και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση του κόστους, αλλά και την εξάλειψη καίριων σημείων που μπορούν να οδηγήσουν στην αστοχία ολόκληρου του συστήματος σε περίπτωση βλάβης.

Συνέπεια της απουσίας κεντρικού κόμβου ελέγχου είναι η ανάγκη κατά την κίνηση του εξοπλισμού χρήστη να μεταφερθούν μέσω του δικτύου όλες οι πληροφορίες για αυτόν, από τον έναν κόμβο eNodeB σε κάποιον άλλο. Οι πληροφορίες αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν τόσο πληροφορίες ελέγχου και διαχείρισης, όσο και δεδομένα χρήστη (πχ buffers). Απαιτούνται λοιπόν μηχανισμοί οι οποίοι θα αποτρέπουν την απώλεια πληροφορίας κατά τη μεταφορά του ελέγχου από έναν κόμβο σε άλλο. Όλες αυτές οι λειτουργίες επιτυγχάνονται μέσω της επικοινωνίας μεταξύ κόμβων eNodeB χρησιμοποιώντας τη διεπαφή X2.

Μία σημαντική δυνατότητα της S1 διεπαφής που συνδέει το δίκτυο πρόσβασης με το δίκτυο κορμού είναι γνωστό ως "S1-flex". Μέσω αυτής πολλαπλοί κόμβοι που ανήκουν στο δίκτυο κορμού και συγκεκριμένα κόμβοι MME και S-GW, μπορούν να καλύπτουν μία κοινή γεωγραφική περιοχή και να συνδέονται μέσω ενός διαπλεγμένου δικτύου (mesh network) με ένα σύνολο κόμβων eNodeB στην περιοχή εκείνη. Με τον τρόπο αυτό, ένας κόμβος eNodeB μπορεί να εξυπηρετεί περισσότερους από ένα κόμβους MME ή S-GW. Το σύνολο τέτοιων κόμβων που εξυπηρετούν μία κοινή περιοχή ονομάζεται μία δεξαμενή MME/S-GW και η αντίστοιχη γεωγραφική περιοχή ονομάζεται "περιοχή δεξαμενής" (pool area). Με τον τρόπο αυτό μπορούν οι εξοπλισμοί χρήστη που ανήκουν στις κυψελλίδες ενός ή περισσότερων κόμβων eNodeB να διαμοιράζονται σε πολλαπλά δίκτυα κορμού επιτρέποντας την εξισορρόπηση φορτίου και εξαλείφοντας μεμονομένα σημεία που μπορούν να προκαλέσουν τον τερματισμό εξυπηρέτησης του χρήστη σε περίπτωση αστοχίας. Σε μια τέτοια περίπτωση οι πληροφορίες για το χρήστη παραμένουν αποθηκευμένες στην ίδια MME, όσο ο εξοπλισμός χρήστη παραμένει στην ίδια περιοχή δεξαμενής.

3.2.3 Διαστρωματωμένη αρχιτεκτονική στο LTE

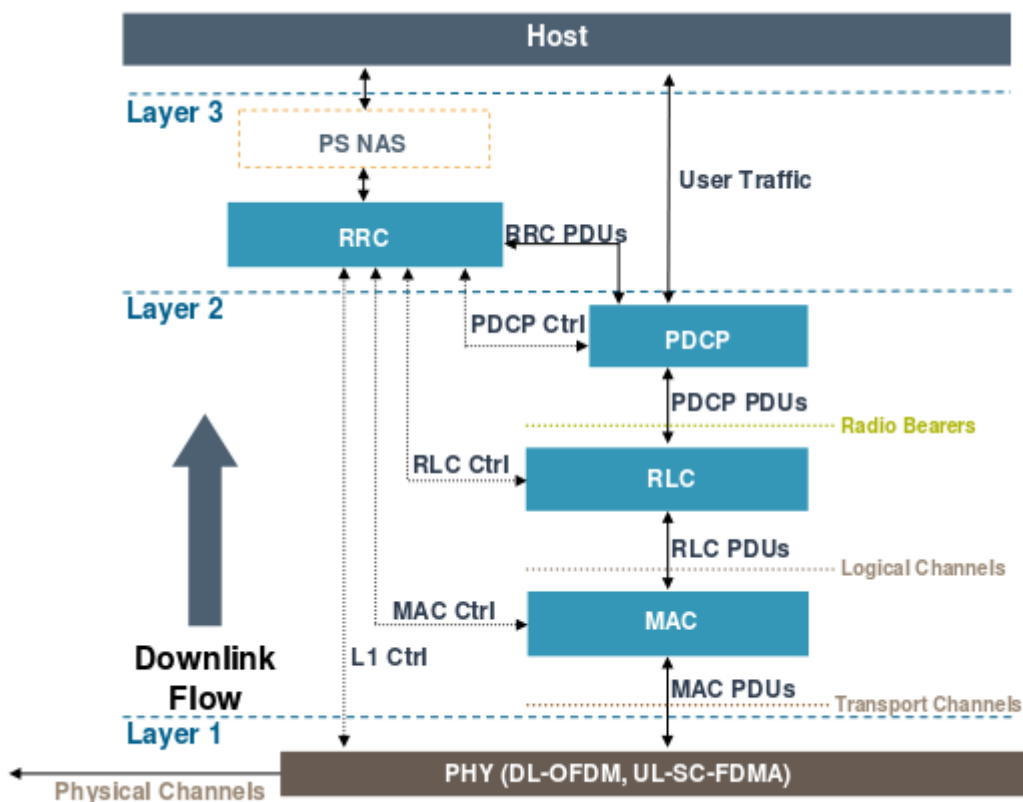
Η διαστρωμάτωση του LTE περιλαμβάνει το επίπεδο του δικτύου, της ζεύξης δεδομένων και το φυσικό επίπεδο (Σχήμα 3.4).

Το στρώμα μη πρόσβασης (non-access stratum, NAS) αποτελεί το υψηλότερο στρώμα του επιπέδου ελέγχου μεταξύ του εξοπλισμού χρήστη και της MME. Οι βασικές λειτουργίες που επιτελεί είναι η υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών και η υποστήριξη λειτουργιών διαχείρισης των συνεδριών καθώς και η διατήρηση της συνδεσιμότητας IP μεταξύ του εξοπλισμού χρήστη και της πύλης προς δίκτυα πακέτων δεδομένων (PDN GW).

Το πρωτόκολλο RRC υλοποιείται τόσο στους χρήστες όσο και στον eNodeB και αποτελεί επίσης μέρος του στρώματος δικτύου. Οι βασικές του λειτουργίες

περιλαμβάνουν τη broadcast μετάδοση που αφορά το NAS και το AS, καθώς και λειτουργίες ασφαλείας (διαχείριση κλειδιών), κινητικότητας, εξασφάλισης ποιότητας υπηρεσιών και μετρήσεων και αναφοράς [3].

Το στρώμα ζεύξης δεδομένων στο LTE περιλαμβάνει τρία διακριτά υποστρώματα. Από αυτά, το στρώμα πρωτοκόλλου σύγκλισης πακέτων δεδομένων περιλαμβάνει μία σειρά από λειτουργίες υψηλού επιπέδου, πάνω από τις λειτουργίες ενθυλάκωσης που εδράζουν στο RLC. Στο επίπεδο του χρήστη αυτές περιλαμβάνουν την αποκρυπτογράφηση, την αποσυμπίεση κεφαλίδων ROHC, την αρίθμηση ακολουθίας και την απόρριψη των διπλότυπων πακέτων [4]. Υπάρχει μία μοναδική ξεχωριστή διεργασία RLC για κάθε φορέα.



Σχήμα 3.4: Διαστρωμάτωση του LTE.

Το επόμενο υπο-στρώμα είναι το επίπεδο ελέγχου ασύρματης ζεύξης (Radio Link Control, RLC), όπου επιτελείται η τμηματοποίηση και η επανασυναρμολόγηση των δεδομένων [4]. Αυτό μπορεί να γίνει βάσει τριών διαφορετικών λειτουργιών: διαφανή λειτουργία, λειτουργία με επιβεβαιώσεις ή λειτουργία χωρίς επιβεβαιώσεις. Η τμηματοποίηση περιλαμβάνει την παραλαβή μίας PDU στρώματος RLC και τη δημιουργία μίας ή περισσοτέρων SDU στρώματος RLC. Το μέγεθος των SDU δεν είναι σταθερό, αλλά εξαρτάται από τις συνθήκες του καναλιού. Επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος μεταφοράς είναι οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, η απόσταση, οι ισχύες που χρησιμοποιούνται και η διαμόρφωση.

Το στρώμα MAC είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση των λειτουργιών HARQ που περιγράφονται στην ενότητα 3.3.1. Επιπλέον, αποτελεί το σημείο σύγκλισης των καναλιών μεταφοράς και των λογικών καναλιών (σχήμα 2.5) και είναι υπεύθυνο για την επιλογή των διαφόρων εναλλακτικών μορφών για τα σήματα ελέγχου και την οργάνωση της διεξαγωγής μετρήσεων και την επεξεργασία τους.

Τέλος, το φυσικό στρώμα περιλαμβάνει την επεξεργασία των δεδομένων και τη δημιουργία του φυσικού σήματος που μεταδίδεται. Περιγράφεται πιο αναλυτικά στην ενότητα 3.4.

3.2.4 Ανοδικά και καθοδικά κανάλια στο LTE

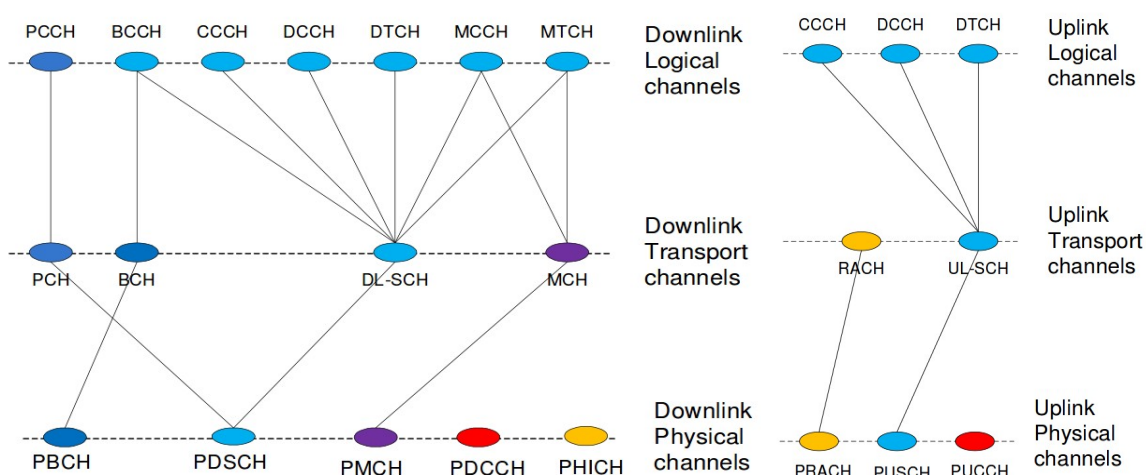
Στο LTE ορίζονται τρεις διαφορετικοί τύποι καναλιών. Τα λογικά κανάλια σχετίζονται με τη ροή δεδομένων από τα ανώτερα στρώματα καθώς η αποστολή των δεδομένων από και προς αυτά λαμβάνει χώρα μέσω των λογικών καναλιών. Τα κανάλια μεταφοράς αποτελούν ένα ενδιάμεσο επίπεδο όπου οι λογικές ροές συνενώνονται και υποβάλλονται στις ίδιες διεργασίες κωδικοποίησης κατά την προετοιμασία τους για μετάδοση. Τα κανάλια μεταφοράς στη συνέχεια απεικονίζονται σε φυσικά κανάλια τα οποία αντιστοιχούν άμεσα σε συγκεκριμένους πόρους στο φυσικό επίπεδο.

Παρακάτω περιγράφονται μερικά από τα πιο σημαντικά λογικά κανάλια, κανάλια

μεταφοράς και φυσικά κανάλια, τόσο καθοδικά όσο και ανοδικά (Σχήμα 3.5) [6].

Λογικά Κανάλια

- BCCH (Broadcast Control Channel). Μέσω του καναλιού αυτού μεταδίδονται πληροφορίες ελέγχου σε όλους τους εγγεγραμμένους χρήστες (broadcast μετάδοση).
- CCCH (Common Control Channel). Το κανάλι αυτό μεταδίδει καθοδική και ανοδική πληροφορία ελέγχου μεταξύ χρηστών και του δικτύου. Χρησιμοποιείται για χρήστες οι οποίοι δεν έχουν εγκαταστήσει ακόμη συνδέσεις RRC με το δίκτυο.
- DCCH (Dedicated Control Channel). Αποτελεί και αυτό ένα αμφίδρομο κανάλι μετάδοσης πληροφορίας ελέγχου όπως το CCCH. Χρησιμοποιείται για χρήστες οι οποίοι έχουν εγκαταστήσει σύνδεση RRC.



Σχήμα 3.5: Λογικά κανάλια, κανάλια μεταφοράς και φυσικά κανάλια στο LTE.

- DTCH (Dedicated Traffic Channel). Το κανάλι αυτό είναι ένα σημείο προς σημείο κανάλι, που αντιστοιχίζεται σε έναν μοναδικό χρήστη για τη μεταφορά πληροφορίας σχετικά με το χρήστη. Μπορεί να είναι είτε καθοδικό είτε ανοδικό.

Κανάλια Μεταφοράς

- BCH (BroadcastChannel). Μέσω του καναλιού αυτού μεταδίδεται πληροφορία με σταθερή προκαθορισμένη μορφή σε όλη την περιοχή κάλυψης της κυψελίδας.
- DL-SCH (Downlink Shared Channel). Αποτελεί το σημαντικότερο καθοδικό κανάλι μεταφοράς και υποστηρίζει μία σειρά από χαρακτηριστικά που εξασφαλίζουν αποδοτική και εύρωστη μετάδοση. Η μετάδοση στο κανάλι αυτό γίνεται με τη δημιουργία HARQ διεργασιών και με τον τρόπο αυτό επιτελείται τόσο έλεγχος ροής όσο και έλεγχος σφαλμάτων και επαναμετάδοση (ενότητα 3.3.1). Ο ρυθμός μετάδοσης καθορίζεται δυναμικά μέσω της επιλογής της διαμόρφωσης, της κωδικοποίησης και της ισχύος μετάδοσης. Η ανάθεση πόρων μπορεί να γίνει είτε δυναμικά είτε ημι-στατικά (πχ για VoIP).
- UL-SCH (Uplink Shared Channel). Το κανάλι αυτό είναι το ανοδικό, αντίστοιχο με το καθοδικό DL-SCH, κανάλι. Υποστηρίζει επίσης HARQ διεργασίες και δυναμική προσαρμογή καναλιού μέσω του καθορισμού διαμόρφωσης, κωδικοποίησης και ισχύος μετάδοσης, καθώς επίσης δυναμική και ημι-στατική ανάθεση πόρων.

Φυσικά Κανάλια

- PDSCH (Physical Downlink Channel). Χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των καναλιών μεταφοράς DL-SCH και PCH. Η διαμόρφωση σε αυτό είναι QPSK, 16-QAM ή 64-QAM.

- PDCCH (Physical Control Channel). Μέσω του καναλιού αυτού ενημερώνεται ο εξοπλισμός χρήστη για την ανάθεση πόρων για το DL-SCH και το PCH, καθώς επίσης και πληροφορίες σχετικά με τις διεργασίες HARQ για το DL-SCH. Επιπλέον μεταφέρει την παραχώρηση (grant) για την ανοδική κίνηση. Η πληροφορία στο κανάλι αυτό διαμορφώνεται με QPSK.
- PHICH (Physical HARQ Indication Channel). Το κανάλι αυτό μεταφέρει τις επιβεβαιώσεις ACK/NACK για τα ανοδικά δεδομένα. Η διαμόρφωση είναι επίσης QPSK.
- PUSCH (Physical Uplink Shared Channel). Στο κανάλι αυτό απεικονίζεται το κανάλι μεταφοράς UL-SCH. Η διαμόρφωση μπορεί να επιλέγεται δυναμικά ανάμεσα από QPSK, 16-QAM και 64-QAM.
- PUCCH (Physical Uplink Control Channel). Το κανάλι αυτό μεταφέρει τις HARQ επιβεβαιώσεις (ACKs/NACKs) για την καθοδική μετάδοση. Επιπλέον μεταφέρει τα αιτήματα προγραμματισμού μετάδοσης από τους χρήστες καθώς και τις τιμές CQI που κωδικοποιούν την κατάσταση του καναλιού όπως την ανταλλάτουν οι χρήστες. Η διαμόρφωση σε αυτό το κανάλι μπορεί να είναι είτε BPSK είτε QPSK.

3.3 MAC επίπεδο στο LTE

3.3.1 HARQ διεργασίες

Το LTE χρησιμοποιεί διεργασίες υβριδικής αίτησης αυτόματης επανάληψης (Hybrid Automatic Repeat Request) ως μέθοδο ελέγχου ροής και σφαλμάτων. Όπως δηλώνει και το όνομα της, μία διεργασία HARQ, είναι μία υβριδική μορφή δύο διαφορετικών λειτουργιών. Κατά την εμπρόσθια διόρθωση σφαλμάτων (forward error correction, FEC) προστίθεται πλεονάζουσα πληροφορία στα δεδομένα που μεταδίδονται. Η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται ώστε να είναι δυνατή η διόρθωση

των σφαλμάτων (σε κάποιες περιπτώσεις τουλάχιστον) στη μεριά του παραλήπτη.

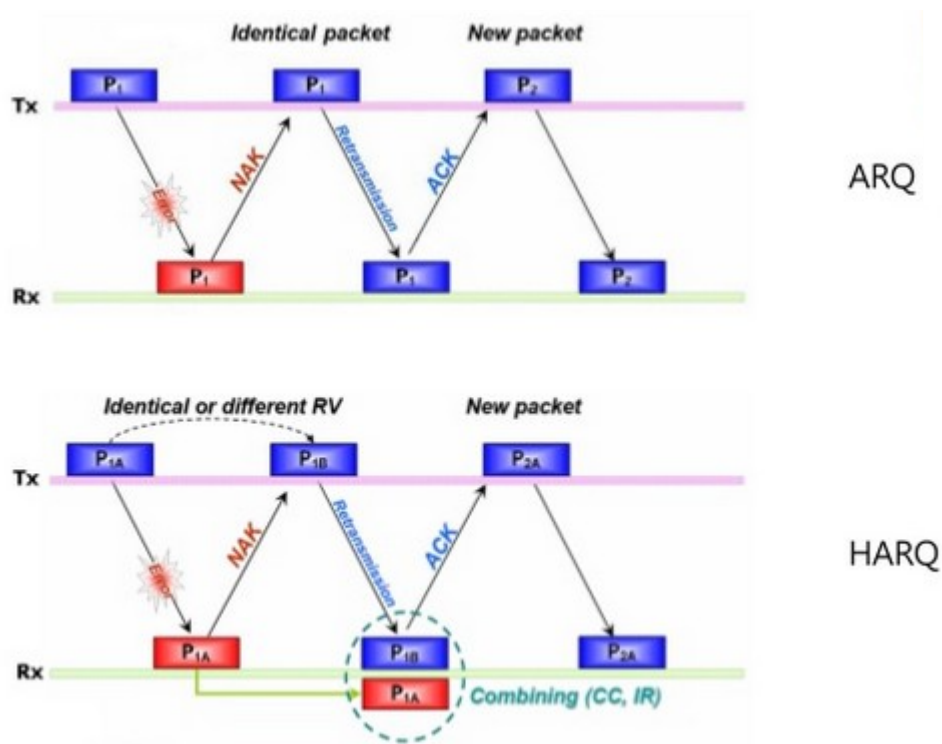
Η δεύτερη λειτουργία αποτελεί έναν συνδυασμό ελέγχου σφαλμάτων και ελέγχου ροής και ονομάζεται αίτηση αυτόματης επανάληψης (Automatic Response Request). Ο παραλήπτης σε αυτή την περίπτωση αποστέλλει μία επιβεβαίωση ορθής λήψης κάθε φορά που τα δεδομένα λαμβάνονται χωρίς σφάλμα. Αν υπάρχει σφάλμα, τότε ο παραλήπτης αποστέλλει μία αρνητική επιβεβαίωση. Το πρόβλημα με αυτή την πρακτική είναι ότι ακόμη και για σφάλμα ενός bit είναι απαραίτητη η επαναμετάδοση όλου του πακέτου.

Με το συνδυασμό των δύο αυτών μεθόδων επιτυγχάνεται αποδοτικός έλεγχος σφαλμάτων. Η πλεονάζουσα πληροφορία στη FEC, χρησιμοποιείται για τη διόρθωση σφαλμάτων. Το εύρος των σφαλμάτων που μπορούν να διορθωθούν εξαρτάται από τον ρυθμό κωδικοποίησης, δηλαδή από την ποσότητα της πλεονάζουσας πληροφορίας. Σε περίπτωση εκτεταμένων σφαλμάτων δεν είναι πρακτικά χρήσιμο να χρησιμοποιηθεί FEC, καθώς θα πρέπει να συμπεριληφθεί πολλή πληροφορία οδηγώντας σε χαμηλές αποδόσεις. Σε αυτή την περίπτωση είναι χρήσιμη η λειτουργία ARQ.

Η υλοποίηση στο LTE περιλαμβάνει αρχικά μία κωδικοποίηση χαμηλού ρυθμού μέσω κωδικοποίησης turbo, που συγκαταλέγεται στις συνελκτικές κωδικοποιήσεις [7]. Στη συνέχεια τα bit προς μετάδοση λαμβάνονται από τη διάτρηση (puncturing) των κωδικοποιημένων δεδομένων. Κατά τη λήψη και αποδιαμόρφωση στο άλλο άκρο της μετάδοσης, αν τα δεδομένα δεν μπορούν να διορθωθούν μέσω FEC, αποστέλλεται ένα αίτημα επαναμετάδοσης. Υπάρχουν δύο δυνατότητες για τον αποστολέα: είτε να στείλει ακριβώς τα ίδια bits που μετέδωσε και πριν, είτε να επαναλάβει τη διαδικασία κωδικοποίησης συμπεριλαμβάνοντας όμως διαφορετική πλεονάζουσα πληροφορία. Η πρώτη προσέγγιση ονομάζεται chase combining, ενώ η δεύτερη incremental redundancy.

Στο επίπεδο MAC τα δεδομένα προς μετάδοση ανατίθενται σε κάποιο κανάλι

μεταφοράς. Το σημαντικότερο καθοδικό κανάλι μεταφοράς είναι το DL-SCH, ενώ το αντίστοιχο ανοδικό είναι το UL-SCH.



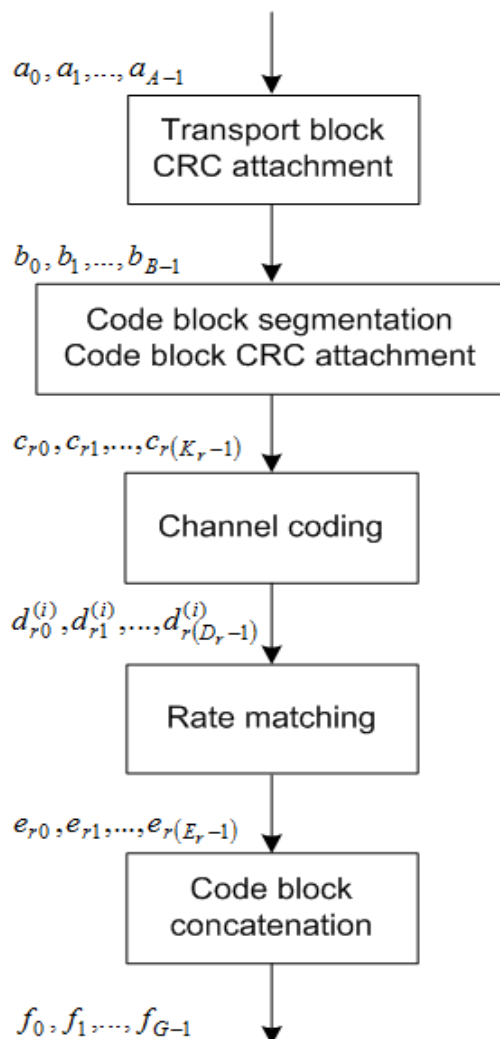
Σχήμα 3.6: Διεργασίες ARQ και HARQ.

3.3.2 Επεξεργασία δεδομένων στο επίπεδο MAC

Οι σημαντικότερες λειτουργίες που περιλαμβάνει το DL-SCH είναι οι ακόλουθες [8]:

Επισύναψη του CRC στο μπλοκ μεταφοράς. Ο κώδικας CRC (cyclic redundancy check) χρησιμοποιείται για την ανίχνευση σφαλμάτων στα μπλοκ μεταφοράς. Για τον υπολογισμό του CRC χρησιμοποιείται το σύνολο των bits στο μπλοκ μεταφοράς. Το

μπλοκ μεταφοράς διαιρείται με ένα πολυώνυμο κυκλικής παραγωγής όπως περιγράφεται στο [8] και το αποτέλεσμα είναι ένα σύνολο από 24 bit ισοτιμίας. Τα bit αυτά επισυνάπτονται στο τέλος του μπλοκ μεταφοράς.



Σχήμα 3.7: Κωδικοποίηση και επίτευξη επιθυμητού ρυθμού.

Τμηματοποίηση του κωδικοποιημένου μπλοκ και επισύναψη του CRC. Το μπλοκ εισόδου περιέχει $B=A+24$ bits, όπου A το αρχικό μέγεθος των δεδομένων και 24 το μήκος του CRC. Στο LTE, ορίζεται ένα ελάχιστο και ένα μέγιστο μέγεθος του κωδικοποιημένου μπλοκ έτσι ώστε το μέγεθος αυτό να είναι συμβατό με τα μεγέθη

που υποστηρίζονται από τον κωδικοποιητή turbo. Συγκεκριμένα το ελάχιστο μήκος του κωδικοποιημένου μπλοκ είναι 40 bits και το μέγιστο 6144 bits. Αν το μέγεθος B δεν ικανοποιεί τον ελάχιστο και μέγιστο περιορισμό, τότε το μπλοκ εισόδου υφίσταται τμηματοποίηση σε μεμονωμένα μπλοκ κώδικα. Σε καθένα από αυτά επισυνάπτεται και πάλι ένας κώδικας CRC, χρησιμοποιώντας ένα νέο πολυώνυμο παραγωγής. Αν είναι απαραίτητο, προσαρτάται στην αρχή κάθε τμήματος ένα σύνολο από bit πλήρωσης, έτσι ώστε το συνολικό μήκος να είναι ένα έγκυρο μέγεθος για τον παρεμβολέα turbo (turbo interleaver). Σε περίπτωση που το μήκος B είναι μικρότερο από 40 bits χρησιμοποιούνται bit πλήρωσης ώστε να επιτευχθεί το ελάχιστο μέγεθος.

Κωδικοποίηση καναλιού

Τα μπλοκ κώδικα υφίστανται κωδικοποίηση turbo (turbo coding) που αποτελεί έναν τύπο εμπρόσθιας διόρθωσης σφαλμάτων (forward error correcting, FEC) που μπορεί να βελτιώσει τη χωρητικότητα του καναλιού με την προσθήκη πλεονάζουσας πληροφορίας. Το σχήμα κωδικοποίησης είναι η παράλληλη συνενωτική συνελεκτική κωδικοποίηση (parallel concatenated convolutional code, PCCC) με δύο αναδρομικούς συνελεκτικούς κωδικοποιητές και με έναν παρεμβολέα τετραγωνικού μεταθετικού πολυωνύμου (Quadratic permutation polynomial interleaver). Η έξοδος του κωδικοποιητή αποτελείται από τρεις ρόες.

Η είσοδος στον πρώτο κωδικοποιητή είναι η ροή εισόδου στον κωδικοποιητή turbo. Η είσοδος στον δεύτερο συστατικό κωδικοποιητή είναι η έξοδος από τον QPP παρεμβολέα η οποία αποτελεί μία μετάθεση της αλληλουχίας εισόδου. Υπάρχουν δύο έξοδοι από τους δύο κωδικοποιητές: η συστηματική ακολουθία και η ακολουθία ιστοτιμίες. Η έξοδος για κάθε ακολουθία μπορεί να προσδιοριστεί με τη χρήση της συνάρτησης μεταφοράς όπως περιγράφεται στο [7]. Ο κωδικοποιητής αρχικοποιείται θέτοντας όλα τα bit στην τιμή 0.

Σε έναν συμβατικό συνελεκτικό κωδικοποιητή, κατά τον τερματισμό προσαρτώνται 0 στο τέλος της ροής εισόδου. Η αποκωδικοποίηση πραγματοποιείται με τη γνώση της αρχικής και τελικής κατάστασης του κωδικοποιητή. Καθώς δεν είναι δυνατόν να τεθεί

ο κωδικοποιητής στην κατάσταση όπου όλα τα bit είναι 0, χρησιμοποιείται ο τερματισμός trellis. Δηλαδή, κατά τον τερματισμό τα τελευταία bits επαντροφοδοτούνται στην είσοδο κάθε κωδικοποιητή και τα πρώτα τρία από αυτά χρησιμοποιούνται για τον τερματισμό.

Τα δεδομένα στη συνέχεια διέρχονται από έναν παρεμβολέα QPP (interleaver). Ο ρόλος του είναι η διασπορά των bit πληροφορίας έτσι ώστε αν συμβεί κάποιο σφάλμα ριπής να μπορούν να διορθωθούν τα σφάλματα, καθώς οι δύο ροές επηρεάζονται διαφορετικά.

Επιθυμητός ρυθμός δεδομένων. Από το στάδιο καθορισμού του ρυθμού μετάδοσης (rate matching) προκύπτει μία ροή δεδομένων με επιθυμητό ρυθμό κωδικοποίησης. Καθώς το πλήθος των bits που είναι διαθέσιμα για τη μετάδοση εξαρτάται από τους διαθέσιμους πόρους, ο αλγόριθμος μέσα από το rate matching μπορεί να παράγει τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης. Οι τρεις ροές από τον κωδικοποιητή turbo συνδυάζονται και υποβάλλονται σε συλλογή bit (bit collection) δημιουργώντας ένα κυκλικό buffer. Μέσω της επιλογής και της παράλειψης bit δημιουργείται μια ροή bit με τον επιθυμητό ρυθμό κωδικοποίησης.

Συλλογή bit, επιλογή και μετάδοση: Το στάδιο επιλογής bit δημιουργεί ένα ένα εικονικό κυκλικό buffer συνδυάζοντας τις τρεις κωδικοποιημένες ροές bit. Η επιλογή γίνεται έτσι ώστε να επιτευχθούν ίδια επίπεδα προστασίας για κάθε αλληλουχία ιστοιμίας. Το πρωτόκολλο υβριδικής αίτησης αυτόματης επανάληψης (hybrid automatic repeat request, HARQ) έχει ενσωματωθεί στον αλγόριθμο καθορισμού ρυθμού κωδικοποίησης του LTE. Για οποιοδήποτε επιθυμητό ρυθμό κωδικοποίησης τα bit στο buffer επιλέγονται ξεκινώντας από μία καθορισμένη θέση που εξαρτάται από την έκδοση πλεονασμού (redundancy version, RV) που καθορίζει τον αριθμό των επαναματαδόσεων.

Σύμπτυξη μπλοκ κώδικα: Στο στάδιο αυτό τα μπλοκ που αντιστοιχούν πλέον στον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης συμπτύσσονται και πάλι σε ένα σύνολο από bit.

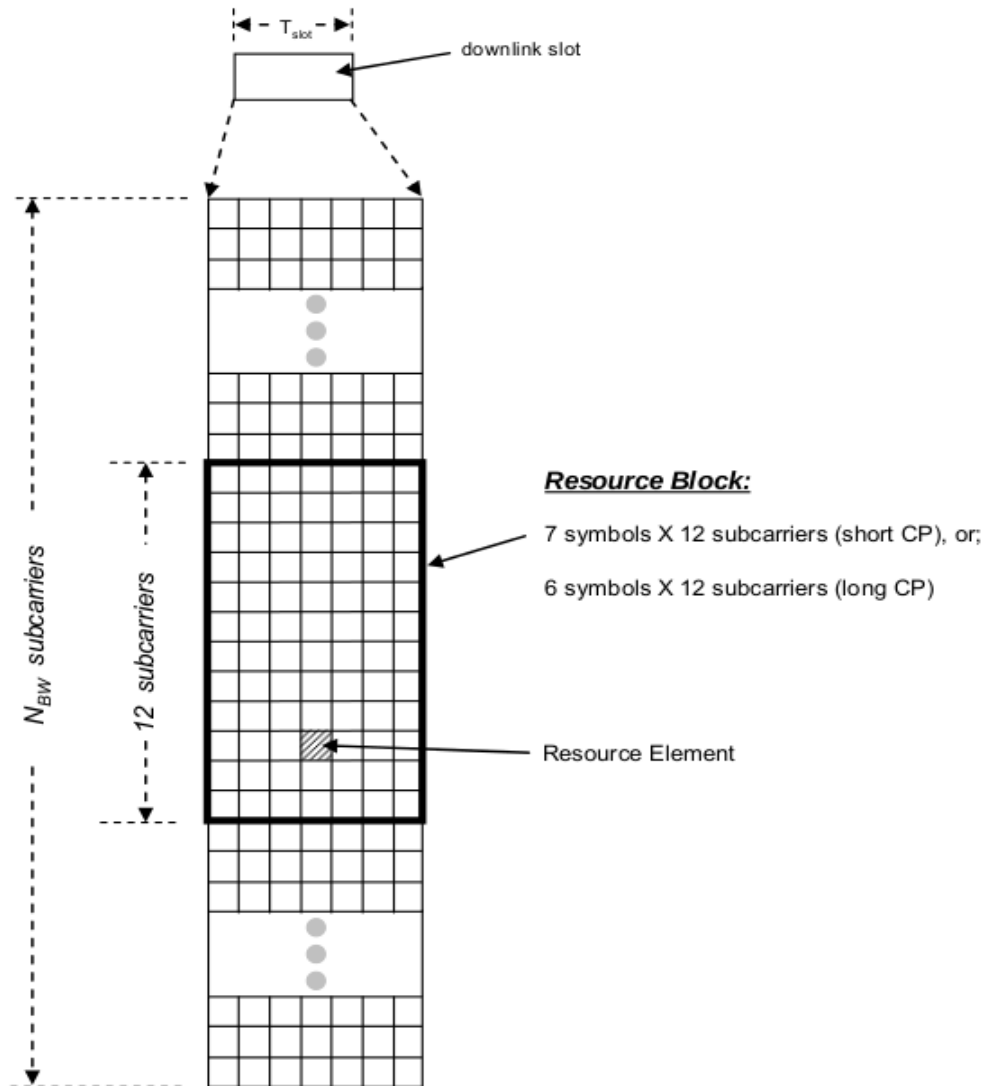
3.4 Φυσικό επίπεδο στο LTE

3.4.1 Το πλέγμα πόρων για το LTE

Στο LTE χρησιμοποιείται η OFDM ως σχήμα πολυπλεξίας τόσο για την καθοδική, όσο και για την ανοδική κίνηση [6]. Παρόλο που αυτό συνεπάγεται επιπρόσθετη πολυπλοκότητα σε σχέση με χρονοπρογραμματισμό πόρων, η τεχνική αυτή είναι μακράν αποδοτικότερη από πακετο-κεντρικές προσεγγίσεις σε σχέση με αποδοτικότητα και καθυστέρηση. Στην OFDMA, αποδίδεται ένας συγκεκριμένος αριθμός από υποφορείς για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Αυτά ονομάζονται φυσικά μπλοκ πόρων (physical resource blocks, PRBs) και έχουν τόσο μία συνιστώσα στο πεδίο του χρόνου, όσο και μία συνιστώσα στο πεδίο της συχνότητας (Σχήμα 3.8) . Η ανάθεση των πόρων γίνεται από τη λειτουργία χρονοπρογραμματισμού στους κόμβους eNodeB.

Το μεταδιδόμενο καθοδικό σήμα μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα πλέγμα πόρων όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8. Κάθε πλαίσιο μέσα στο πλέγμα αντιπροσωπεύει ένα μοναδικό υποφορέα για μία περίοδο συμβόλων και ονομάζεται στοιχείο πόρου (resource element). Στην περίπτωση χρήσης MIMO υπάρχει ένα ξεχωριστό πλέγμα πόρων για κάθε κεραία μετάδοσης.

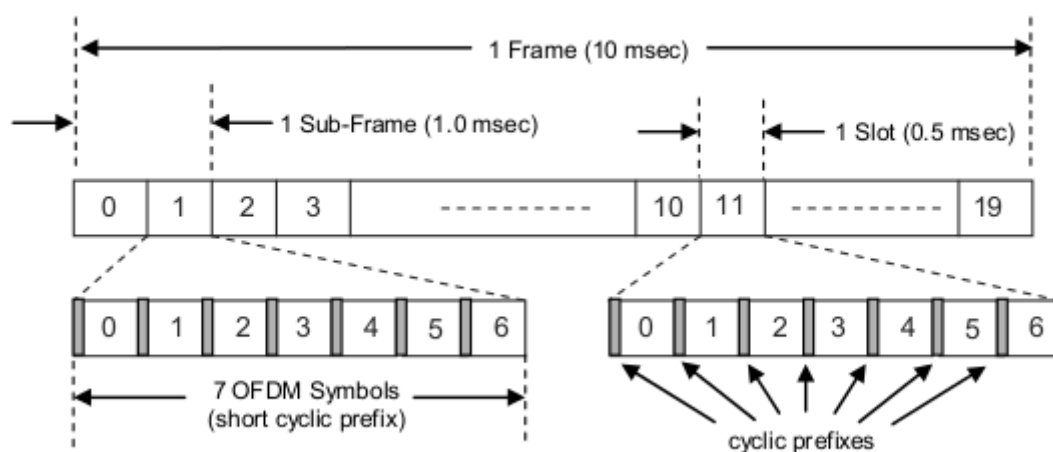
Κεντρική έννοια για το φυσικό επίπεδο του LTE είναι, επίσης, το πλαίσιο (frame). Στο Σχήμα 3.9 φαίνεται η δομή του πλαισίου σε FDD (frequency division duplexing) λειτουργία. Εναλλακτικά η αμφίδρομη μετάδοση μπορεί να υλοποιηθεί μέσω διαίρεση χρόνου (3.4.9). Τα πλαίσια LTE έχουν διάρκεια 10 ms και υποδιαιρούνται σε 10 υποπλάγια με διάρκεια 1.0 ms το καθένα. Κάθε υποπλάσιο χωρίζεται σε δύο ίσες θυρίδες (slots) διάρκειας 0.5 ms. Καθεμία από αυτές περιέχει είτε 7 είτε 6 σύμβολα OFDM ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται το κανονικό ή το εκτεταμένο μήκος για το κυκλικό πρόθεμα.



Σχήμα 3.8: Μπλόκ πόρων (Resource Block) στο LTE.

Ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων υποφορέων εξαρτάται από το συνολικό εύρος ζώνης του συστήματος. Οι προδιαγραφές ορίζουν τις παραμέτρους ανάλογα με το ονομαστικό εύρος ζώνης. Ένα φυσικό μπλοκ πόρων μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί σε 12 συνεχόμενους υποφορείς στο πεδίο της συχνότητας (εύρος ζώνης 15 kHz) και μία θυρίδα στο πεδίο του χρόνου (ίσο με 0.5 ms). Αυτό αποτελεί και το μικρότερο σύνολο από πόρους που μπορεί να ανατεθεί από τον ελεγκτή χρονοπρογραμματισμού στο σταθμό βάσης.

Σε αντίθεση με πακετο-κεντρικά δίκτυα, το LTE δε χρησιμοποιεί ένα προίμιο φυσικού στρώματος ώστε να διευκολύνει τον προσδιορισμό της απόκλισης (offset), την εκτίμηση του καναλιού και τον συγχρονισμό. Αντί για αυτό, ειδικά σήματα αναφοράς εμφυτεύονται μέσα στα PRBs, όπως περιγράφεται στις ενότητες 3.4.2-3.4.3.



Σχήμα 3.9: Πλαίσιο και υποπλαίσια στο LTE.

3.4.2 Καθοδικά σήματα αναφοράς

Πέρα από τα δεδομένα που μεταδίδονται στο πλέγμα μέσω των φυσικών καναλιών, το LTE περιλαμβάνει την εισαγωγή συμβόλων αναφοράς (ή αλλιώς σύμβολα-πιλότοι) σε συγκεκριμένες θέσεις στο πλέγμα χρόνου-συχνότητας που επιτρέπουν την εκτίμηση του καναλιού. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η εύρωστη αποδιαμόρφωση του σήματος από τον εξοπλισμό χρήστη. Για την καθοδική κίνηση τα σήματα-πιλότοι εισάγονται στο πρώτο σύμβολο OFDM (κανονικό κυκλικό πρόθεμα) ή το τρίτο από το τέλος σύμβολο OFDM (εκτεταμένο κυκλικό πρόθεμα) κάθε υποπλαίσιου ενώ στη διάσταση της συχνότητας χρησιμοποιούνται έξι

υποφορείς. Επιπλέον, υπάρχει μία απόκλιση τριών υποφορέων μεταξύ των διαδοχικών συμβόλων μεταφοράς και επομένως υπάρχουν συνολικά τέσσερα σύμβολα αναφοράς σε κάθε μπλοκ πόρων (resource block).

Η εκτίμηση του καναλιού από τον εξοπλισμό χρήστη γίνεται μέσω αριθμητικής παρεμβολής χρησιμοποιώντας πολλαπλά σήματα αναφοράς. Στην περίπτωση δύο κεραιών μετάδοσης τα σήματα αναφοράς τοποθετούνται στις δύο κεραιές με διαφορά τριών υποφορέων στο πεδίο της συχνότητας. Για την απρόσκοπτη εκτίμηση των συνθηκών μετάδοσης, όταν μεταδίδεται ένα σήμα αναφοράς από μία κεραία, δεν πραγματοποιείται μετάδοση από καμία άλλη στο συγκεκριμένο σημείο χρόνου-συχνότητας. Τα σύμβολα αναφοράς έχουν μιγαδικές τιμές οι οποίες προσδιορίζονται τόσο από τη θέση στο πλέγμα όσο και από την ταυτότητα του κελιού. Συγκεκριμένα, υπάρχουν 510 διαφορετικές ακολουθίες σήματος που αντιστοιχούν σε 510 διαφορετικούς αριθμούς ταυτότητας των κελιών. Τα σύμβολα αναφοράς προκύπτουν από το γινόμενο 170 διαφορετικών ψευδοτυχαίων ακολουθιών που αντιστοιχούν σε 170 ομάδες αριθμών ταυτότητας και τρεις ορθογώνιες ακολουθίες που αντιστοιχούν σε μια συγκεκριμένη ταυτότητα κελιού μέσα στην ομάδα κυψελίδων.

3.4.3 Ανοδικά σήματα αναφοράς

Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι ανοδικών σημάτων αναφοράς στο LTE. Ο πρώτος είναι τα σήματα αναφοράς αποδιαμόρφωσης (demodulation reference signals, DM-RS) που χρησιμοποιούνται για την εύρωστη αποδιαμόρφωση από τους κόμβους eNodeB. Τα σήματα αυτά πολυπλέκονται στο χρόνο με δεδομένα ανοδικής κίνησης και μεταδίδονται στο τέταρτο SC-FDMA σύμβολο για κυκλικό πρόθεμα κανονικής διάρκειας ή στο τρίτο SC-FDMA σύμβολο για κυκλικό πρόθεμα εκτεταμένης διάρκειας. Στη διάσταση της συχνότητας, το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης είναι ίσο με το εύρος ζώνης των δεδομένων.

Ο δεύτερος τύπος σημάτων είναι τα σήματα αναφοράς στάθμισης (sounding reference signals, SRS) που χρησιμοποιούνται για το χρονοπρογραμματισμό

ανοδικής κίνησης που παίρνει υπόψη την κατάσταση του καναλιού (δήλαδη την εξάρτηση από τη συχνότητα). Τα σήματα DM-RS δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό το σκοπό, καθώς ανατίθενται μέσα στα πλαίσια του ήδη ανατεθέντος φάσματος σε κάποιον χρήστη. Τα SRS εισάγονται ως ευρύτερα σήματα αναφοράς και τυπικά μεταδίδονται στο τελευταίο SC-FDMA σύμβολο κάθε υποπλαισίου. Καθώς δεν επιτρέπεται η μετάδοση σε αυτό το μπλοκ, η σηματοδότηση αυτή αποφέρει μία μείωση 7% στο συνολικό ανοδικό ρυθμό δεδομένων. Η επιλογή SRS είναι προαιρετική και μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να ελεγχθεί το επίπεδο επιβάρυνσης. Δεν μπορεί ωστόσο να απαλειφθεί τελείως σε μία κυψελίδα. Τα σήματα στάθμισης ανήκουν ταυτόχρονα σε πολλούς χρήστες στο πεδίο της συχνότητας.

Κάθε χρήστης που επιθυμεί να αποκτήσει πρόσβαση σε ένα LTE σύστημα, πρέπει να ακολουθήσει μία σειρά από στάδια συγχρονισμού με βάση τα οποία ο εξοπλισμός χρήστη μπορεί να καθορίσει το χρονισμό και το εύρος συχνοτήτων που θα επιτρέψουν την αποδιαμόρφωση του σήματος [8]. Επιπλέον θα πρέπει να προγραμματιστούν οι μεταδόσεις με σωστό χρονισμό και να ληφθούν οι κρίσιμες παράμετροι του συστήματος.

Υπάρχουν συνολικά τρεις διαφορετικές απαιτήσεις συγχρονισμού στο LTE:

- η ανάκτηση του χρονισμού συμβόλου βάσει του οποίου καθορίζεται ή αρχή κάθε συμβόλου.
- ο συγχρονισμός συχνότητας φέροντος που εξαλείφει την επίδραση σφαλμάτων συχνότητας που προκαλούνται από τη μετατόπιση Doppler.
- ο συγχρονισμός ρολογιού δειγματοληψίας

Οι εξοπλισμοί χρήστη επιτελούν δύο διαφορετικές διεργασίες αναζήτησης κελιού. Η πρώτη αφορά στον αρχικό συγχρονισμό, ενώ η δεύτερη αφορά την ανίχνευση

γειτονικών κελιών στην περίπτωση της προετοιμασίας της μεταπομπής (handover). Και στις δύο περιπτώσεις ο εξοπλισμός χρήστη χρησιμοποιεί δύο διαφορετικά σήματα που μεταδίδονται από κάθε κελί. Την πρωτεύουσα ακολουθία συγχρονισμού (primary synchronization sequence, PSS) και τη δευτερεύουσα ακολουθία συγχρονισμού (secondary synchronization sequence, SSS). Η ανίχνευση αυτών των σημάτων επιτρέπει στον εξοπλισμό χρήστη να ολοκληρώσει το συγχρονισμό στο χρόνο και τη συχνότητα και να ανακτήσει σημαντικές παραμέτρους όπως τον αριθμό ταυτότητας του κελιού, το μήκος του κυκλικού προθέματος και τη μέθοδο πρόσβασης (FDD/TDD). Με την ολοκλήρωση αυτού το σταδίου ο εξοπλισμός χρήστη είναι σε θέση να αποκωδικοποιήσει το PBCH (Physical broadcast channel) και να ανακτήσει σημαντικές πληροφορίες για το σύστημα.

Το πρωτεύον σήμα συγχρονισμού μεταδίδεται στο τελευταίο OFDM σύμβολο του πρώτου και του πέμπτου υποπλαισίου και επιτρέπει στον εξοπλισμό χρήστη να εξαγάγει το συγχρονισμό πλαισίου ανεξάρτητα από το μήκος του κυκλικού προθέματος. Το δευτερεύον σήμα συγχρονισμού είναι το ίδιο ανεξάρτητα από τον τύπο του κυκλικού προθέματος. Ο εξοπλισμός χρήστη μπορεί να προσδιορίσει το μήκος του κυκλικού προθέματος ελέγχοντας την απόλυτη θέση του δευτερεύοντος σήματος συγχρονισμού. Ο εξοπλισμός χρήστη μπορεί επίσης να καθορίσει τα σύνορα μεταξύ υποπλαισίων καθώς το δευτερεύον σήμα συγχρονισμού εναλλάσσονται με συγκεκριμένο τρόπο μεταξύ των μεταδόσεων. Στο πεδίο της συχνότητας τα σήματα συγχρονισμού καλύπτουν τα έξι κεντρικά μπλοκ ανεξάρτητα από το συνολικό εύρος ζώνης, γεγονός που επιτρέπει στον εξοπλισμό χρήστη να επιτύχει το συγχρονισμό, χωρίς την εκ των προτέρων γνώση του εύρους ζώνης του καναλιού. Οι συνολικοί υποφορείς που χρησιμοποιούν τα σήματα συγχρονισμού είναι 62 και χαρτογραφούνται εκατέρωθεν του συνεχούς υποφορέα ο οποίος δε χρησιμοποιείται. Έτσι απομένουν 5 υποφορείς σε καθένα από τα δύο ακραία μπλοκ πόρων.

3.4.4 Κωδικοποίηση και διαμόρφωση καθοδικών δεδομένων

Οι λέξεις κώδικα που προκύπτουν από το DL-SCH υποβάλλονται σε τυχαιοποίηση

(scrambling), διαμόρφωση, απεικόνιση σε στρώματα, προ-κωδικοποίηση και απεικόνιση σε στοιχεία πόρων όπως φαίνεται Σχήμα 3.10 [6].

Τυχαιοποίηση: Οι λέξεις κώδικα (codewords) πολλαπλασιάζονται bit προς bit με μία ορθογώνια αλληλουχία και μία αλληλουχία τυχαιοποίησης διαφορετική για κάθε εξοπλισμό χρήστη. Οι αλληλουχίες τυχαιοποίησης είναι ψευδοτυχαίες και δημιουργούνται χρησιμοποιώντας μία αλληλουχία Gold μήκους 31 η οποία αρχικοποιείται με βάση τον αριθμό της θυρίδας μέσα στον αναγνωριστικό κωδικό του δικτύου.

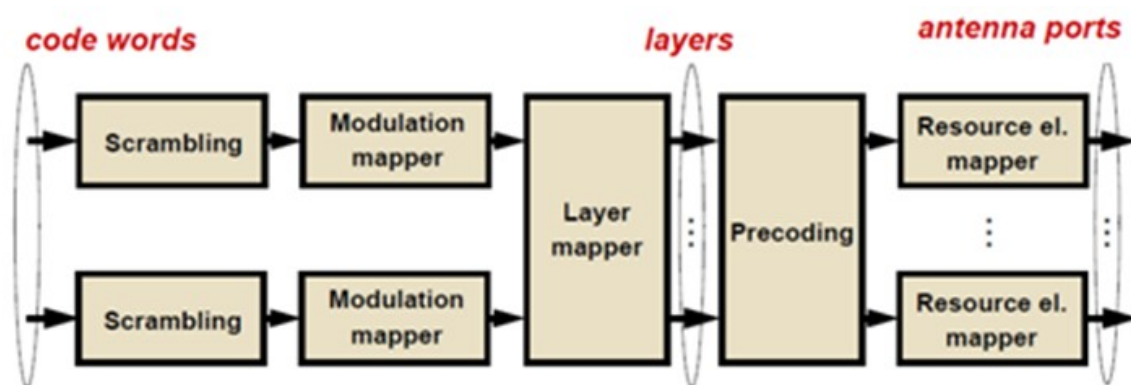
Διαμόρφωση: Οι τυχαιοποιημένες αλληλουχίες υποβάλλονται σε διαμόρφωση QPSK, 16-QAM ή 64-QAM. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την προσαρμογή σε δυναμικά μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Απεικόνιση σε στρώματα (layer mapping): Τα μιγαδικά σύμβολα που παράγονται από τη διαμόρφωση των δεδομένων αντιστοιχίζονται σε ένα, δύο ή τέσσερα στρώματα ανάλογα με το είδος MIMO που χρησιμοποιείται και τον αριθμό των κεραιών μετάδοσης. Στην περίπτωση χρήσης μίας κεραιάς υπάρχει μόνο ένα στρώμα.

Προκωδικοποίηση (precoding): Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι προ-κωδικοποίησης για μετάδοση σε μία κεραιά, διαφορετικότητα μετάδοσης (transmit diversity) και χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing). Ο προ-κωδικοποιητής παίρνει ένα μπλοκ από κάθε στρώμα στο οποίο απεικονίστηκαν τα δεδομένα και παράγει μία αλληλουχία από μιγαδικά σύμβολα για κάθε κεραιά μετάδοσης.

Απεικόνιση σε στοιχεία πόρων: Για κάθε μία από τις κεραιές που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση στο PDSCH τα σύμβολα στην έξοδο της προ-κωδικοποίησης αντιστοιχίζονται στα διαθέσιμα στοιχεία πόρων (δηλαδή σε αυτά που δεν ανήκουν σε άλλα φυσικά κανάλια/σήματα όπως PCFICH, PHICH, PDCCH, PBCH, σήματα συγχρονισμού και αναφοράς). Ο αριθμός των στοιχείων πόρων για κάθε ροή

εξαρτάται από τον αριθμο των μπλοκ πόρων που έχει ανατεθεί στο PDSCH. Η ανάθεση σε φυσικούς πόρους γίνεται κατά αυξανόμενο δείκτη υποφέροντος και εξαντλώντας όλα τα διαθέσιμα στοιχεία πόρων και συμβόλων OFDM πριν γίνει η ανάθεση του επόμενου μπλοκ.



Σχήμα 3.10: Κωδικοποίηση και διαμόρφωση στο LTE.

3.4.5 Ορθογωνική Πολυπλεξία Διάρθρωσης Συχνότητας

Η ορθογωνική πολυπλεξία διάρθρωσης συχνότητας (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) αναπτύχθηκε ως τεχνική κατά τη δεκαετία του 1950, αλλά βρήκε ευρεία πρακτική εφαρμογή κατά τη δεκαετία του 1980, όπου αποτέλεσε μέρος των ευρωπαϊκών προτύπων για την ψηφιακή μετάδοση ήχου (digital audio broadcasting, DAB) και την ψηφιακή μετάδοση βίντεο (digital video broadcasting, DVB) [9]. Στα χρόνια αυτά τροφοδοτήθηκε μία έντονη διαμάχη σχετικά με τη χρήση τεχνικών που στηρίζονται στην ορθογωνική πολυπλεξία διάρθρωσης συχνότητας και των εναλλακτικών μεθόδων που βασίζονται στη μετάδοση μονού φορέα σε συνδυασμό με εξισορρόπηση στο πεδίο της συχνότητας (single carrier transmission with frequency division equalization, SCT-FDE) [10], [11]. Στα μέσα της δεκαετίας του 1990, προτάθηκε η μέθοδος της ορθογωνικής διάρθρωσης συχνότητας με πολλαπλή

πρόσβαση (orthogonal frequency division-multiple access OFDMA) για broadcast μετάδοση σε συστήματα καλωδικής τηλεόρασης [12]. Παρόλο που προτιμήθηκαν τελικά μέθοδοι SCT-FDE για το σύστημα αυτό, η εργασία αυτή αποτέλεσε το έναυσμα ενεργούς έρευνας που οδήγησε στην επίλυση κάποιων από τα μειονεκτήματα της OFMDA [13], [14] .

Τα επόμενα χρόνια τεχνικές OFDM βρήκαν εφαρμογή σε πρότυπα ασύρματης μετάδοσης. Το πρότυπο για το WiFi (IEEE 802.11) προέβλεπε τη χρήση OFDM για μετάδοση, αλλά η πολλαπλή πρόσβαση στηριζόταν αποκλειστικά σε πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (time-division multiple access). Ένας αντίστοιχος συνδυασμός OFDM και TDMA προτάθηκε και για το σταθερό WiMax (IEEE 802.16), με τη δυνατότητα ωστόσο της εναλλακτικής επιλογής της χρήσης SCT-FDE ή OFDMA. Αργότερα, το WiMax Forum εκδήλωσε την προτίμηση του για τη λύση OFDM/TDMA. Οι ίδιες επιλογές ήταν διαθέσιμες και για το πρότυπο του κινητού WiMax, αλλά σε αυτή την περίπτωση επιλέχθηκε η λύση της OFDMA τεχνικής οδηγώντας σε ασυμβατότητες μεταξύ του σταθερού και κινητού WiMax.

Το επόμενο στάδιο στην εξέλιξη των τεχνικών OFDM, σημειώθηκε παράλληλα με τη δημιουργία του σχεδίου για τη σύμπραξη τρίτης γενιάς (3rd generation partnership project – 3GPP). Με την οριστικοποίηση της έκδοσης 8 (release 8) του προτύπου, πραγματοποιήθηκε ένα τεχνολογικό άλμα εγκαταλείποντας τις μεθόδους που στηρίζονται σε OFDM/TDMA και την υιοθέτηση της OFDMA για την καθοδική (downlink) κίνηση και της ορθογωνικής πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας μονού φορέα (single-carrier orthogonal frequency division multiplexing SC-OFDM) για την ανοδική (uplink) κίνηση. Η τελευταία αυτή επιλογή υπαγορεύτηκε από το χαμηλό λόγο μέγιστης προς μέση ισχύος (peak to average power ratio, PPAR), που αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη σχεδίαση φορητών τηλεφωνικών συσκευών.

3.4.6 OFDMA

Η ορθογωνική πολυπλεξία συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης (Orthogonal

Frequency Division Multiplexing Multiple Access, OFDMA) αποτελεί την επιλογή για το καθοδικό κομμάτι του LTE. Παρόλο που εμπεριέχει πολυπλοκότητα σε σχέση με το χρονοπρογραμματισμό των πόρων, παρέχει πολύ καλύτερη απόδοση σε ό,τι αφορά αποδοτικότητα και καθυστέρηση. Στην OFDMA, ανατίθεται στους χρήστες ένας συγκεκριμένος αριθμός από υποφορείς για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Αυτοί αντιστοιχούν στα μπλοκ φυσικών πόρων (PRBs) κατά την ορολογία των προτύπων του LTE. Τα PRBs περιλαμβάνουν τόσο μία χρονική συνιστώσα, όσο και μία συνιστώσα συχνότητας και η ανάθεση τους γίνεται από τη λειτουργία του χρονοπρογραμματισμού του eNodeB.

Η διάρκεια ενός πλαισίου LTE είναι 10 ms. Καθένα από αυτά περιλαμβάνει 10 υποπλαίσια διάρκειας 1 ms. Κάθε υποπλαίσιο διαιρείται επίσης σε δύο θυρίδες διάρκειας 0.5 ms. Οι θυρίδες μπορούν να περιέχουν είτε 6 είτε 7 σύμβολα OFDM ανάλογα με τη διάρκεια του κυκλικού προθέματος. Ο συνολικός αριθμός από διαθέσιμους υποφορείς εξαρτάται από το εύρος ζώνης του συστήματος. Οι προδιαγραφές του LTE προβλέπουν τη δυνατότητα χρήσης από 1.25 MHz ως 20 MHz.

Το μεταδιδόμενο σήμα ανατίθεται σε διαφορετικά PRBs. Ένα PRB περιλαμβάνει 12 συνεχόμενους υποφορείς καθένας από τους οποίους αντιστοιχεί σε 15 kHz φάσματος και 0.5 ms στο πεδίο του χρόνου. Στο χρονικό διάστημα αυτό μπορούν να αντιστοιχούν είτε 6 είτε 7 σύμβολα OFDM, ανάλογα με το μήκος του κυκλικού προθέματος που χρησιμοποιείται ως σύνορο μεταξύ των συμβόλων για την αντιμετώπιση της διασυμβολικής παρεμβολής. Σε αντίθεση με πακετο-κεντρικά δίκτυα, το LTE δε χρησιμοποιεί ένα προοίμιο στο φυσικό επίπεδο ώστε να διευκολύνεται η εκτίμηση του καναλιού ή ο συγχρονισμός, αλλά χρησιμοποιεί σήματα αναφοράς που περιλαμβάνουν πολλαπλά PRBs.

Οι απαιτήσεις για το ανοδικό κομμάτι του LTE διαφέρουν από αυτές του καθοδικού. Για παράδειγμα, η κατανάλωση ισχύος αποτελεί έναν παράγοντα κλειδί για τα τερματικά των χρηστών. Επομένως, ο υψηλός λόγος μεταξύ μέγιστης και μέσης

ισχύος (Peak to Average Power Ratio, PARP) και τα σχετικά υψηλά κέρδη ισχύος (power gains) που σχετίζονται με την τεχνολογία OFDMA, αποτελούν σημαντικά μειονεκτήματα για την καθοδική επικοινωνία. Αντίθετα, η ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης είναι συμβατή με τις ανάγκες αυτής. Παρόλο που η βασική αρχιτεκτονική του πομπού και του δέκτη είναι παρόμοιες και η απόδοση σε σχέση με την προστασία από εξασθένιση πολλαπλών διαδρομών είναι αντίστοιχη, ο λόγος PARP είναι σημαντικά μικρότερος, καθώς η τεχνική αυτή είναι ουσιαστικά μία τεχνική μονού φορέα.

3.4.7 SC-OFDMA

Σε αντίθεση με την OFDMA, το σήμα SC-OFDMA εμφανίζει πολύ μικρότερο PARP καθώς περιλαμβάνει ένα μόνο υποφορέα. Η υλοποίηση στο LTE περιλαμβάνει τη χρήση του διακριτού μετασχηματισμού Fourier για τη μεταφορά εξάπλωσης OFDM. Μέσω του διακριτού μετασχηματισμού Fourier επιτυγχάνεται η πολυπλεξία ανοδικών μεταδόσεων σε συγκεκριμένα μπλοκ πόρων σύμφωνα με τον χρονοπρογραμματισμό που συντονίζεται από τον eNodeB. Σε αντίθεση με την OFDMA, τα δεδομένα παραμένουν σειριακά. Με αυτή την προσέγγιση απαιτείται ένας εξισορροπιστής κατά τη λήψη στον eNodeB ώστε να αντιμετωπιστούν οι στρεβλώσεις που εισάγει το κανάλι. Από την άλλη, η SC-FDMA δεν είναι τόσο ευαίσθητη σε αστάθειες συχνότητας ή στο φαινόμενο Doppler εξαιτίας του γεγονότος ότι περιλαμβάνει έναν μοναδικό υποφορέα.

Οι υποφορείς της SC-FDMA μπορούν να απεικονιστούν με δύο τρόπους: είτε τοπικά είτε κατανεμημένα. Η περίπτωση της τοπικής ανάθεσης είναι πιο απλή και επιπλέον, μπορεί να εκμεταλλευτεί κέρδη που εξαρτώνται από τη συχνότητα μέσω χρονοπρογραμματισμού εξαρτώμενου από το κανάλι. Δηλαδή, μέσω της ανάθεσης των ανοδικών συχνοτήτων στους χρήστες βάσει των ευνοϊκών συνθηκών διάδοσης.

3.4.8 Αμφίδρομη λειτουργία στο LTE

Το LTE προβλέπει τόσο τη χρήση του συζευγμένου φάσματος μέσω της αμφίδρομης λειτουργίας διαίρεσης συχνότητας (frequency-division duplex, FDD), όσο και τη χρήση μη συζευγμένου φάσματος μέσω της αμφίδρομης λειτουργίας διαίρεσης χρόνου (time-division duplex, TDD) [6]. Και οι δύο μέθοδοι έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και το ποια είναι η καταλληλότερη εξαρτάται από την κάθε εφαρμογή (Πίνακας 3.1).

Η χρήση του FDD και του συζευγμένου φάσματος αναμένεται να βοηθήσει τη μετάβαση από τα παλαιότερα συστήματα τρίτης γενιάς στο LTE, καθώς τα περισσότερα από αυτά χρησιμοποιούν FDD. Ωστόσο, υπάρχει μία έντονη τάση για την παράλληλη υποστήριξη της λειτουργίας TDD. Πέρα από τα υπόλοιπα πλεονεκτήματα, η TDD λειτουργία μπορεί να βοηθήσει τη μετάβαση από το TD-SCDMA. Επομένως, αναμένεται στις περισσότερες περιπτώσεις η ταυτόχρονη υποστήριξη και των δύο λειτουργιών. Με τον τρόπο αυτό οι λειτουργίες TDD μπορούν να επωφεληθούν από τις οικονομίες κλίμακας που μέχρι τώρα ήταν διαθέσιμες μόνο για συστήματα που χρησιμοποιούν FDD.

Η αμφίδρομη λειτουργία διαίρεσης συχνότητας, χρησιμοποιεί την ανεξάρτητη μετάδοση και η λήψη σημάτων επιτυγχάνεται με τη χρήση δύο διαφορετικών ζωνών συχνοτήτων. Συντονιζόμενοι ο πομπός και αποδέκτης σε διαφορετικές συχνότητες καθιστούν δυνατή την ταυτόχρονη επικοινωνία και προς τις δύο κατευθύνσεις. Για την εύρυθμη λειτουργία FDD είναι απαραίτητη η απόσταση μεταξύ των δύο ζωνών συχνοτήτων ώστε να αποφεύγονται οι παρεμβολές. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ως διαχωριστικό ένα στενό εύρος ζώνης που ονομάζεται ζώνη φρούρησης (guard band).

Η λειτουργία TDD από την άλλη χρησιμοποιεί μία μοναδική ζώνη συχνοτήτων η οποία διαμοιράζεται για μετάδοση και λήψη. Η διάκριση μεταξύ τους επιτυγχάνεται πολυπλέκοντάς τα αντίστοιχα δεδομένα στο πεδίο του χρόνου. Η λειτουργία TDD

μπορεί να βρει εφαρμογή τόσο για την περίπτωση των ψηφιακών δεδομένων ριπής, όσο και για τη μετάδοση φωνής. Καθώς οι χρονικές περίοδοι μετάδοσης είναι συγκριτικά μικρές, δεν υπάρχει αισθητή καθυστέρηση ακόμη και κατά τη συνομιλία μεταξύ δύο χρηστών.

Ενώ οι μεταδόσεις FDD απαιτούν μία ζώνη φρούρησης ανάμεσα στις συχνότητες μετάδοσης πομπού/δέκτη, τα συστήματα TDD απαιτούν ένα χρονικό διάστημα που θα οριοθετεί τα σύνορα μεταξύ καθοδικής και ανοδικής μετάδοσης. Το διάστημα αυτό πρέπει να επαρκεί ώστε να επιτρέπει την άφιξη των δεδομένων στη μία πλευρά, πριν η άλλη πλευρά να αρχίσει να μεταδίδει. Παρόλο που αυτή η καθυστέρηση είναι τυπικά μικρή, όταν οι εναλλαγές μεταξύ μετάδοσης και λήψης είναι συχνές, ακόμη και ένα σύντομο διάστημα φρούρησης μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες επιβαρύνσεις και μειωμένη απόδοση. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα οξύ κατά τη μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις.

Τυπικά η κίνηση προς τις δύο κατευθύνσεις σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας δεν είναι ισορροπημένη. Για παράδειγμα, σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας υπάρχει συνήθως ένας πολύ μεγαλύτερος όγκος δεδομένων που μεταδίδεται κατά την καθοδική φορά, από τον όγκο δεδομένων που μεταδίδεται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αυτό σημαίνει, ότι ιδανικά θα έπρεπε η χωρητικότητα της ζεύξης να είναι μεγαλύτερη κατά την καθοδική κατεύθυνση. Τα συστήματα TDD, επιτρέπουν την εύκολη ρύθμιση της χωρητικότητας σε κάθε κατεύθυνση, μεταβάλλοντας απλά τον ανατιθέμενο αριθμό από χρονικές θυρίδες. Αυτό μπορεί να γίνεται δυναμικά ώστε να ανταποκρίνεται στη μεταβαλλόμενη ζήτηση.

Ένα άλλο θέμα που άπτεται της αμφίδρομης διάδοσης είναι το θέμα της καθυστέρησης. Καθώς η μετάδοση είναι ελεγχόμενη σε σχέση με το χρόνο, είναι δυνατή η περίπτωση κατά την οποία υπάρχουν δεδομένα έτοιμα προς μετάδοση, τα οποία ωστόσο δεν μπορούν να μεταδοθούν άμεσα ως αποτέλεσμα της ανάθεσης της συγκεκριμένης χρονικής θυρίδας στην κίνηση αντίθετης κατεύθυνσης. Η καθυστέρηση αυτή είναι τυπικά της τάξης των λίγων ms και εξαρτάται από τους

χρόνους που σχετίζονται με την πλαισίωση, μπορεί ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι σημαντική.

Επομένως, οι λειτουργίες TDD και FDD έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και η χρήση τους πρέπει να σταθμιστεί απέναντι στις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής. Στον πίνακα 3.1 γίνεται μία σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων.

3.4.9 Λειτουργία TDD στο LTE

Η λειτουργία TDD στηρίζεται στη μετάδοση μικρών ριπών από ανοδικά ή καθοδικά δεδομένα σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Καθώς οι περιόδους αυτές μετάδοσης είναι μικρές, δεν υπάρχει καμία παρατηρήσιμη καθυστέρηση από το χρήστη. Όπως οι FDD μεταδόσεις απαιτούν μία ζώνη φρούρησης που να διαχωρίζει

Πίνακας 3.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα λειτουργίας TDD και FDD.

Παράμετρος	TDD	FDD
Συζευγμένο φάσμα	Δεν απαιτεί συζευγμένο φάσμα	Απαιτεί συζευγμένο φάσμα με ικανοποιητικό διαχωρισμό
Κόστος hardware	Χαμηλότερο κόστος	Μεγαλύτερο κόστος λόγω της απαίτησης διπλέκτη (diplexer) για διαχωρισμό μεταξύ πομπού-δέκτη
Ασυμμετρία UL/DL	Μπορεί να προσαρμοστεί δυναμικά σε διαφορετικούς λόγους UL/DL	Σταθερή ανάθεση πόρων σε ανοδική και καθοδική κίνηση
Περίοδος/Φάσμα Φρούρησης	Απαιτεί χρονικό διάστημα φρούρησης	Απαιτεί φάσμα φρούρησης
Ασυνεχής μετάδοση	Απαιτεί ασυνεχή μετάδοση που μπορεί να έχει επιπτώσεις στον ενισχυτή	Χρησιμοποιεί συνεχή μετάδοση
Παρεμβολή μεταξύ θυρίδων γειτονικών καναλιών	Απαιτεί συγχρονισμό μεταξύ γειτονικών κυψελίδων ώστε να μην υπάρχει παρεμβολή	Δεν επηρεάζεται από παρεμβολή αυτού του είδους

το ανοδικό και το καθοδικό εύρος ζώνης η λειτουργία TDD απαιτεί την ύπαρξη χρονικής απόστασης μεταξύ καθοδικών και ανοδικών μεταδόσεων. Στο LTE αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση των ειδικών (special) υποπλαισίων. Σε αυτά περιλαμβάνεται ένα κενό χρονικό διάστημα, η διάρκεια του οποίου μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με τις συνθήκες.

Η λειτουργία TDD στο LTE περιλαμβάνει 7 διαφορετικές λειτουργίες κατά τις οποίες τα υποπλαίσια μήκους 1 ms αντίθενται περιοδικά σε ανοδικά, καθοδικά και σε ειδικά υποπλαίσια [6]. Τα ειδικά υποπλαίσια περιέχουν καθοδική πληροφορία ελέγχου ή και δεδομένα, ένα διάστημα φρούρησης καθώς και ανοδικά δεδομένα. Υπάρχουν 10 διαφορετικά είδη ειδικών υποπλαισίων που προβλέπουν διαφορετικά μεγέθη πληροφορίας. Στον Πίνακα 3.2 συνοψίζονται οι διαθέσιμες λειτουργίες στο LTE.

Η λειτουργία TDD είναι πιο ευέλικτη από την FDD σε περιπτώσεις όπου η κίνηση δεν είναι ισορροπημένη μεταξύ των δύο κατευθύνσεων. Στην περίπτωση αυτή, θα έπρεπε ιδανικά να μπορεί ρυθμιστεί η χωρητικότητα σε κάθε κατεύθυνση. Με τη χρήση ενός συστήματος TDD αυτό είναι δυνατό σε κάποιο βαθμό μέσω της ανάθεσης περισσότερων/λιγότερων υποπλαισίων σε κάθε κατεύθυνση. Συχνά, αυτό πρέπει να γίνεται δυναμικά, ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η προσαρμογή του συστήματος στις κυμαινόμενες απαιτήσεις μετάδοσης.

Από την άλλη, η λειτουργία TDD έχει ένα βασικό μειονέκτημα σε σχέση με την καθυστέρηση. Είναι πιθανόν τα δεδομένα να μην μπορούν να μεταδοθούν άμεσα ως αποτέλεσμα της πολυπλεξίας στο χρόνο μεταξύ αποστολής και λήψης. Υπεισέρχεται λοιπόν μία πρόσθετη καθυστέρηση της τάξης των ms που δεν υπάρχει στη λειτουργία FDD. Επιπρόσθετα, η αύξηση αυτή για το LTE περιλαμβάνει και μεγαλύτερη πολυπλοκότητα σε σχέση με την αποστολή επιβεβαιώσεων, καθώς για λειτουργία TDD είναι δυνατόν επιβεβαιώσεις για διαφορετικά υποπλαίσια να πρέπει να μεταδοθούν στο ίδιο υποπλαίσιο.

Πίνακας 3.2: Διαφορετικές λειτουργίες TDD στο LTE.

Δείκτης λειτουργίας TDD	Αριθμός Υποπλασίου									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	D	S	U	D	D	D	S	U	U	D
3	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
5	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Το σύνολο προτύπων που συνιστούν το LTE, αποτελεί μία ιδιαίτερα λεπτομερή και σύνθετη συλλογή από διαδικασίες και παραμέτρους ώστε να εξασφαλίζεται η αποδοτικότητα και η σταθερότητα κάτω από διαφορετικά σενάρια λειτουργίας. Αυτή η πολυπλοκότητα είναι αναπόφευκτη καθώς το LTE έχει σχεδιαστεί ώστε να αποτελέσει ένα ενιαίο πρότυπο με εφαρμογή σε διαφορετικά δίκτυα, διαφορετικές συνθήκες και διαφορετικές κλίμακες. Επομένως η χρήση προσομοιώσεων για τον προσδιορισμό της βέλτιστης λειτουργίας ενός δικτύου LTE αποτελεί μία χρήσιμη προσέγγιση με δεδομένο το πλήθος των tradeoffs που πρέπει να εξεταστούν και την ποικιλία των διαφορετικών τύπων δικτύων που μπορούν να εμπλέκονται σε πρακτικές εφαρμογές.

Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί αρκετοί προσομοιωτές γενικού σκοπού για το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο ζεύξης δεδομένων του LTE. Στις εργασίες [15] και [16], καθώς και [17] και [18] παρουσιάζονται ανεξάρτητα δύο προσομοιωτές LTE γραμμένοι σε Matlab και η χρήση τους για τον προσδιορισμό της επίδρασης των διεργασιών HARQ στην απόδοση του συστήματος. Στην [19] αναπτύχθηκε ένας προσομοιωτής σε C++ για την καθοδική κίνηση που περιλαμβάνει το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο της ζεύξης δεδομένων. Στην εργασία [20] αναπτύχθηκε ένας απλός προσομοιωτής του φυσικού στρώματος του LTE ενώ στην [21] αναπτύχθηκε ένας προσομοιωτής σε ns-3 ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για να ποσοτικοποιήσει τον BLER (Block Error Rate) που παρατηρείται σε σχέση με το λόγο σήματος πρὸς θόρυβο/παρεμβολή και τη διαμόρφωση/κωδικοποίηση που παρατηρήθηκε.

Παρά τις επιμέρους διαφορές στις υλοποιήσεις των προσομοιωτών στις παραπάνω εργασίες, η εφαρμογή τους σε πρακτικά προβλήματα τους ακολουθεί την ίδια προσέγγιση. Συγκεκριμένα πραγματοποιούνται προσομοιώσεις ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση του στρώματος MAC και ιδιαίτερα η επίδραση της χρήσης διεργασιών HARQ, στην απόδοση του συστήματος εκφρασμένης ως μεταβολή του

παρατηρούμενου BLER. Στη συνέχεια αυτή η επίδραση μεταφράζεται σε μία αύξηση του ενεργού συντελεστή σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η λογική αφαίρεση των διεργασιών του στρώματος MAC από την εκτέλεση του μοντέλου και η υποκατάσταση της επίδρασής τους μέσω του προϋπολογισμού της επίδρασης που αυτές επιφέρουν στον παρατηρούμενο λόγο SNR. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η μοντελοποίηση στο επιπέδο συστήματος ([16], [22], [23]) κάτι που θα ήταν υπολογιστικά ανέφικτο με τη χρήση μίας λεπτομερούς προσομοίωσης.

Αν και με βάση την προσέγγιση αυτή μπορούν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα, η χρήση της αναπόφευκτα συνόδευεται από απώλεια χρήσιμης πληροφορίας. Για παράδειγμα, δε λαμβάνεται υπόψη η αύξηση του χρόνου άκρου-προς-άκρο για την επιτυχημένη μετάδοση ενός μπλοκ πληροφορίας ή ο μέσος αριθμός μεταδόσεων για την επιτυχημένη λήψη ενός πακέτου δεδομένων και η κατανάλωση πόρων (overhead) που αυτός επιφέρει. Η εργασία [24] αφορά στο σχεδιασμό του LTE-Sim, ενός αλγορίθμου ανοικτού κώδικα γραμμένου σε C++ στηριγμένου στον γεγονοδηγούμενο προγραμματισμό που περιλαμβάνει μεταξύ άλλων και αυτές τις παραμέτρους. Παραδείγματα χρήσης αυτού του προσομοιωτή αποτελούν οι εργασίες [25], [20], [21] και [27]. Ωστόσο, στις περιπτώσεις αυτές δεν έχει ληφθεί υπόψη η επίδραση του HARQ στις μετρικές επίδοσης του συστήματος.

Ένα θέμα που δεν αντιμετωπίζεται στις εργασίες που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι η λειτουργία σε κατάσταση αμφίδρομης επικοινωνίας διαίρεσης χρόνου (Time Division Duplexing, TDD) καθώς επίσης και της δυναμικής επιλογής του συγκεκριμένου τύπου TDD, ανάλογα με τις συνθήκες κίνησης στο δίκτυο. Σε σχέση με την περίπτωση της αμφίδρομης επικοινωνίας διαίρεσης συχνότητας (FDD) η περίπτωση αυτή έχει λάβει γενικότερα λιγότερο ενδιαφέρον, παρά τα δεδομένα που δείχνουν τη διείσδυση της λειτουργίας TDD στα LTE δίκτυα. Παραδείγματα εργασιών που ασχολούνται με το θέμα της TDD λειτουργίας είναι οι [28] όπου μελετάται η παρεμβολή μεταξύ γειτονικών κελιών που χρησιμοποιούν TDD και [29] όπου προτείνεται ένας αλγόριθμος επιλογής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που

στηρίζεται στην εύρεση του ενεργού SNR. Ωστόσο, και σε αυτή την εργασία η καθυστέρηση και τα overheads των επαναλαμβανόμενων μεταδόσεων αγνοούνται. Επίσης, στις εργασίες [30], [31] και [32] συγκρίνεται η απόδοση μεταξύ TDD και FDD λειτουργίας. Σε καμία από αυτές, ωστόσο, δεν εξετάζεται η επίδραση της προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (ACM) σε συνδυασμό με τη διαμόρφωση TDD.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

5.1 Δημιουργία Μοντέλου

Η προσομοίωση της λειτουργίας LTE έγινε χρησιμοποιώντας το MATLAB. Συγκεκριμένα προσομοιώθηκε η ζεύξη μεταξύ των συσκευών εξοπλισμού χρήστη (UE) και του βασικού κόμβου του LTE, του eNodeB. Τα στρώματα που αναλύθηκαν ήταν το φυσικό και το MAC, που αποτελεί το κατώτερο στρώμα ζεύξης δεδομένων για το LTE.

Εξετάστηκε η λειτουργία SISO (single-in, single out) που χρησιμοποιεί μία κεραία για μετάδοση και μία κεραία για λήψη. Οι βασικές λειτουργίες επεξεργασίας των δεδομένων και διαμόρφωσης/αποδιαμόρφωσης έγιναν χρησιμοποιώντας έτοιμες συναρτήσεις του MATLAB. Ο πίνακας 5.1 περιλαμβάνει τις τιμές για τις σημαντικότερες από τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κλήση των συναρτήσεων. Η επίδραση του καναλιού μοντελοποιήθηκε ως διεργασία προσθετικού λευκού θορύβου (AWGN process) με τον καθορισμό της τιμής του λόγου σήματος προς θόρυβο. Η αντίστροφη σειρά βημάτων έλαβε χώρα κατά τη λήψη.

Η προσομοίωση του δικτύου βασίστηκε στον γεγενοδηγούμενο προγραμματισμό. Πολλαπλές ροές, τόσο καθοδικές όσο και ανοδικές, υλοποιήθηκαν ως διαδικασίες Poisson με τη χρήση εκθετικά κατανομημένων χρόνων άφιξης. Το μέγεθος των πακέτων δεδομένων ήταν σταθερό. Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, η τυχαία αυτή διαδικασία παραγωγής κίνησης αντικαταστάθηκε από πραγματικά δεδομένα. Δύο περιπτώσεις εξετάστηκαν: Μία συνεδρία VoIP και μία διεργασία RealMedia.

Οι προσομοιώσεις έγιναν για πλήρη αμφίδρομη λειτουργία χρησιμοποιώντας διαίρεση χρόνου (TDD): τα καθοδικά υποπλάισια, τα ανοδικά υποπλάισια και τα ειδικά (special) υποπλάισια. Η τελευταία κατηγορία αποτελεί ένα σύνορο μεταξύ των

συνεχόμενων καθοδικών υποπλαισίων και των ανοδικών υποπλαισίων και μπορεί ή όχι να περιέχει καθοδικά δεδομένα, αλλά όχι ανοδικά. Σε αυτή την εργασία όλα τα υποπλαίσια φρούρησης που προσομοιώθηκαν δεν περιείχαν δεδομένα (επιλογή SSC=0).

Το LTE ορίζει επτά διαφορετικές λειτουργίες TDD (οριζόμενα με τη χρήση ενός δείκτη 0-6), οι οποίες διαφέρουν σε σχέση με το πόσα και ποια υποπλαίσια ανατίθενται σε ανοδική και καθοδική λειτουργία σε κάθε πλαίσιο (Πίνακας 3.2) [6]. Η λειτουργία με το μεγαλύτερο λόγο καθοδικής προς ανοδική κίνησης είναι η 5 (8 καθοδικά υποπλαίσια, 1 ανοδικό) ενώ αυτή με το μικρότερο είναι η 0 (2 καθοδικά υποπλαίσια, 6 ανοδικά). Η επίδραση της λειτουργίας TDD που επιλέγεται στις μετρικές απόδοσης του συστήματος και η επιλογή της βέλτιστης λειτουργίας αποτελεί τον πρώτο βασικό άξονα αυτής της εργασίας.

Επιπλέον, εξετάστηκε η επίδραση της διαμόρφωσης και της κωδικοποίησης. Το LTE χρησιμοποιεί προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (adaptive coding and modulation, ACM), καθώς τόσο η ποσότητα πλεονασματικής πληροφορίας που ενσωματώνεται στα δεδομένα, όσο και η τάξη της διαμόρφωσης αλλάζουν με βάση την ποιότητα του καναλιού και τις συνθήκες θορύβου που επικρατούν στο δίκτυο. Η προσαρμογή γίνεται μέσω του δείκτη I_{CMS} , βάσει του οποίου επιλέγεται μία από τις τρεις διαθέσιμες διαμορφώσεις (QPSK, 16QAM ή 64QAM), καθώς και το μέγεθος σε bytes του μεταδιδόμενου μπλοκ μεταφοράς.

Γενικά, η περίπτωση της λειτουργίας TDD είναι πιο σύνθετη σε σχέση με τη λειτουργία FDD, καθώς σε κάποιες περιπτώσεις η αποστολή επιβεβαιώσεων δεν μπορεί να γίνει άμεσα, δεδομένου ότι μεταδόσεις από τους χρήστες γίνονται μόνο σε καθοδικά υποπλαίσια, ενώ μεταδόσεις από τον eNodeB σε ανοδικά. Κάτι αντίστοιχο ισχύει και για τα αιτήματα για μεταδόσεις από τους χρήστες οι οποίες είναι πιθανόν να μην μπορούν να γίνουν άμεσα κατά την άφιξη των δεδομένων. Και οι δύο αυτές καθυστερήσεις έχουν ληφθεί υπόψη στην προσομοίωση. Ειδικά για την περίπτωση των καθυστερήσεων των επιβεβαιώσεων, αυτές έχουν προυπολογιστεί σε συμφωνία

με το αντίστοιχο πρότυπο [7].

Πίνακας 5.1: Βασικές παράμετροι προσομοίωσης.

Μεταβλητή	Τιμή	Σχόλια
NDLRB/ NULRB	6	Πλήθος μπλοκ πόρων (DL/UL). 6 για BW=1.4 MHz.
CyclicPrefix	Normal	Διάρκεια κυκλικού προθέματος.
NSubframe	Ποικίλλει	Αριθμός υποπλασίου. Αλλάζει κατά την προσομοίωση.
CellRefP	0	Αριθμός αναφοράς κεραίας (μόνο μία κεραία).
DuplexMode	TDD	Λειτουργία διαίρεσης χρόνου
TDDConfig	Ποικίλλει	Δείκτης TDD. Αλλάζει κατά την προσομοίωση.
SSC	0	Μορφή ειδικού υποπλασίου.
CFI	1	Δείκτης μορφής ελέγχου.
Modulation	QPSK, 16QAM, 64QAM	Διαμόρφωση. Αλλάζει κατά την προσομοίωση
NLayers	1	Αριθμός στρωμάτων
RV	0-3	Έκδοση πλεονάζουσας μετάδοσης. Αλλάζει κατά την προσομοίωση
TxScheme	Port0	SISO λειτουργία μετάδοσης.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του LTE είναι το υβριδικό πρωτόκολλο αίτησης αυτόματης επανάληψης HARQ, που συνδυάζει τη συμβατική αίτηση αυτόματης επανάληψης με τον εμπρόσθιο έλεγχο σφαλμάτων. Στο LTE λειτουργούν παράλληλα πολλαπλές διαδικασίες HARQ ανοδικές και καθοδικές. Το πλήθος τους καθορίζεται από το πρότυπο (Πίνακας 5.1) [5]. Κατά τη λήψη και την αποδιαμόρφωση των δεδομένων επιχειρείται η σωστή ανάκτησή τους από τον UE ή τον eNodeB. Αν αυτή είναι επιτυχής τότε αποστέλλεται μία επιβεβαίωση (ACK) στον αποστολέα, αν όχι μία "μη επιβεβαίωση" (NACK). Το μοντέλο που υλοποιήθηκε περιλαμβάνει την προσομοίωση ολοκληρωμένων διεργασιών HARQ.

Χαρακτηριστικό γνώρισμα των HARQ διεργασιών στο LTE είναι ο συνδυασμός πολλαπλών αντιγράφων από διαφορετικές μεταδόσεις για την αποδιαμόρφωση και

τη λήψη των δεδομένων χωρίς σφάλματα. Για την προσομοίωση έχει χρησιμοποιηθεί η μέθοδος incremental redundancy κατά την οποία διαφέρει η πλεονάζουσα πληροφορία που συμπεριλαμβάνεται με κάθε επαναμετάδοση. Ο μέγιστος αριθμός συνολικών μεταδόσεων για ένα συγκεκριμένο πακέτο δεδομένων είναι 4. Αν και μετά από αυτές δεν έχει καταστεί δυνατή η χωρίς σφάλματα λήψη τότε το πακέτο απορρίπτεται. Στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε, ανάλογα με την επιτυχή ή όχι έκβαση κάθε μεταάδοσης, γίνεται η αποστολή των επιβεβαιώσεων ACK/NACK με τη δημιουργία ξεχωριστών γεγονότων. Στην περίπτωση επιτυχημένης μετάδοσης ενημερώνονται οι αντίστοιχες μετρικές απόδοσης, ενώ στην αντίθετη περίπτωση αυξάνεται ο αριθμός RV που αντιστοιχεί στην έκδοση της τρέχουσας μετάδοσης, και ενημερώνονται τα buffer. Σε όλες τις περιπτώσεις ελήφθησαν υπόψη όλες οι καθυστερήσεις που οφείλονται είτε στο χρόνο επεξεργασίας ή στην ανάγκη αναμονής για ένα υποπλαίσιο με κατάλληλη κατεύθυνση (ανοδική ή καθοδική).

Πίνακας 5.2: Μέγιστος αριθμός διεργασιών HARQ.

Λειτουργία TDD	Πλήθος καθοδικών HARQ	Πλήθος ανοδικών HARQ
0	4	7
1	7	4
2	10	2
3	9	3
4	12	2
5	15	1
6	6	6

Για κάθε υποπλαίσιο και ανάλογα με το αν είναι καθοδικό ή ανοδικό, γίνεται ο προγραμματισμός των μεταδόσεων μέσω ξεχωριστού γεγονότος. Μία διαδικασία εκ περιτροπής ακολουθήθηκε εξετάζοντας τις μεταδόσεις σε/από κάθε χρήστη με τη σειρά. Αρχικά, εξετάστηκε αν υπάρχουν υπάρχοντες εκρεμμείς διεργασίες HARQ που

μπορούν να προγραμματιστούν. Αν μετά από την ανάθεση αυτών υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι και ο αριθμός των διεργασιών HARQ είναι μικρότερος του μέγιστου, εξετάζεται αν ο ίδιος ο χρήστης έχει δεδομένα προς μετάδοση. Στην περίπτωση που τα παραπάνω ισχύουν δημιουργείται μία νέα διεργασία HARQ και ανατίθεται προς μετάδοση για την αντίστοιχη χρονοθυρίδα. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για τον επόμενο χρήστη μέχρι την εξάντληση των πόρων ή την εξάντληση των χρηστών.

5.2 Εύρεση βέλτιστου σημείου λειτουργίας

Αυτό το κομμάτι της εργασίας αφορούσε την εύρεση των τιμών των συντελεστών TDConfig και Icms, που έχουν ως αποτέλεσμα τη βέλτιστη λειτουργία. Συγκεκριμένα, ως βέλτιστη λειτουργία θεωρήθηκε το σημείο λειτουργίας που ελαχιστοποιεί την παρατηρούμενη καθυστέρησης από άκρο σε άκρο. Σε όλες τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν, το σημείο αυτό αντιστοιχούσε σε χαμηλούς ρυθμούς απόρριψης πακέτων, οπότε αυτή η μετρική δεν ήταν απαραίτητο να εξεταστεί ξεχωριστά.

Η διαδικασία της εύρεσης της βέλτιστης λειτουργίας ξεκινούσε από ένα τυχαίο σημείο (Icms, TDConfig). Σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου, ένα νέο σημείο λειτουργίας επιλεγόταν τυχαία και γινόταν αποδεκτό με μία πιθανότητα αποδοχής που εξαρτώταν από το λόγο της τρέχουσας καθυστέρησης που παρατηρήθηκε προς την καθυστέρηση της νέας κατάστασης. Ως συνάρτηση αποδοχής επιλέχθηκε η λογιστική συνάρτηση.

Τέσσερις διαφορετικές μετρικές απόδοσης εξετάστηκαν. Ο λόγος σύγκλισης περιλαμβάνει το ποσοστό των εκτελέσεων του αλγορίθμου που κατέληξαν στη βέλτιστη λειτουργία σε λιγότερο από 500 επαναλήψεις. Για τον προσδιορισμό του χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα 1000 διαφορετικών εκτελέσεων του αλγορίθμου με τυχαίο σημείο εκκίνησης. Παράλληλα με αυτόν, καταγράφηκε επίσης ο μέσος αριθμός εκτελέσεων που απαιτούνταν ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη λύση.

Επιπλέον, εξετάστηκαν δύο μετρικές που σχετίζονται με την επιβάρυνση (overheads) στη λειτουργία που επιφέρει η αναζήτηση. Ο συντελεστής επιβάρυνσης λειτουργίας οφείλεται στην άγνοια του βέλτιστου σημείου λειτουργίας και ορίζεται ως ο λόγος της μέσης καθυστέρησης των καταστάσεων λειτουργίας προς την ελάχιστη καθυστέρηση βάσει των συνολικών προσομοιώσεων. Από την άλλη, ο συντελεστής επιβάρυνσης εξερεύνησης οφείλεται στην ανάγκη δοκιμής νέων μη βέλτιστων καταστάσεων ώστε να αποκτηθεί μία συνολική εικόνα για όλα τα δυνατά σημεία λειτουργίας του συστήματος. Ορίζεται ως η μέση καθυστέρηση όλων των καταστάσεων που δοκιμάζονται, ανεξάρτητα αν αυτές τελικά γίνονται αποδεκτές ή όχι, προς την ελάχιστη καθυστέρηση.

Αρχικά, ο αλγόριθμος αναζήτησης βέλτιστης λειτουργίας εφαρμόστηκε στα συνολικά δεδομένα από την εκτέλεση του μοντέλου για το χρόνο προσομοίωσης (10,000 ms). Καθώς οι τιμές που αντιστοιχούν σε αυτό το χρονικό διάστημα, δεν είναι πάντα διαθέσιμες στην πράξη, εξετάστηκε η εκτέλεση του αλγορίθμου βασισμένη πάνω στα αποτελέσματα προσομοίωσης μικρών διακριτών χρονικών διαστημάτων (τυπικά 50-250 ms). Η ίδια διαδικασία ακολούθηθηκε και στην περίπτωση δεδομένων πραγματικής κίνησης. Δύο διαφορετικές περιπτώσεις εξετάστηκαν. Μία συνομιλία μέσω VoIP και μία κίνηση RealMedia.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 Εκτέλεση βασικού μοντέλου

Η παρούσα εργασία προσομοιώνει τη λειτουργία ενός δικτύου LTE (4ης γενιάς), με τη μελέτη τόσο του φυσικού όσο και του στρώματος ζεύξης δεδομένων. Στα πλαίσιά της έχει αναπτυχθεί ένα μοντέλο που περιλαμβάνει την επικοινωνία μεταξύ του βασικού κόμβου στο LTE, του eNodeB με τον εξοπλισμό των χρηστών (User Equipment, UE). Σε αντίθεση με άλλες εργασίες ([20-21]) που εστιάζουν στη μελέτη των δικτύων στο φυσικό επίπεδο, εδώ προσομοιώνονται πλήρεις διεργασίες HARQ, οι οποίες περιλαμβάνουν την ολοκληρωμένη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ UE και eNodeB, προς και τις δύο κατευθύνσεις. Αυτό μας επιτρέπει να μελετήσουμε μετρικές που συχνά αγνοούνται από τη βιβλιογραφία, αλλά οι οποίες αποτελούν σημαντικές παραμέτρους κατά την εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας της επικοινωνίας. Σε αυτές συγκαταλέγονται η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, ο μέσος αριθμός των μεταδόσεων και επαναμεταδόσεων για ένα πακέτο δεδομένων και ο λόγος απόρριψης των πακέτων στο επίπεδο της ζεύξης.

Οι βασικές διαστάσεις κατά τις οποίες μελετάται το σύστημα μεταξύ eNodeB και χρηστών είναι δύο: Από τη μία εξετάζεται η επίδραση του συντελεστή I_{cmts} όπως ορίζεται στο πρότυπο [7]. Ο συντελεστής αυτός μπορεί να θεωρηθεί ένα μέτρο του ρυθμού κωδικοποίησης των δεδομένων. Πιο αναλυτικά, ο καθορισμός μίας συγκεκριμένης τιμής για τον I_{cmts} συνεπάγεται και τον καθορισμό τόσο της τάξης της διαμόρφωσης (QPSK, 16-QAM ή 64-QAM), όσο και της ποσότητας των δεδομένων που θα μεταδοθούν σε ένα φυσικό μπλοκ πόρων (resource block).

Σε μία ορθογώνια κατεύθυνση, μελετάται ο δείκτης TDD βάσει του οποίου γίνεται η ανάθεση των πόρων σε ανοδική και καθοδική κίνηση. Συγκεκριμένα, ανάλογα με την τιμή του δείκτη, τα 10 υποπλάισια διάρκειας 1 ms που συγκροτούν ένα πλαίσιο LTE, διαμοιράζονται σε ανοδικά υποπλάισια, καθοδικά υποπλάισια και υποπλάισια

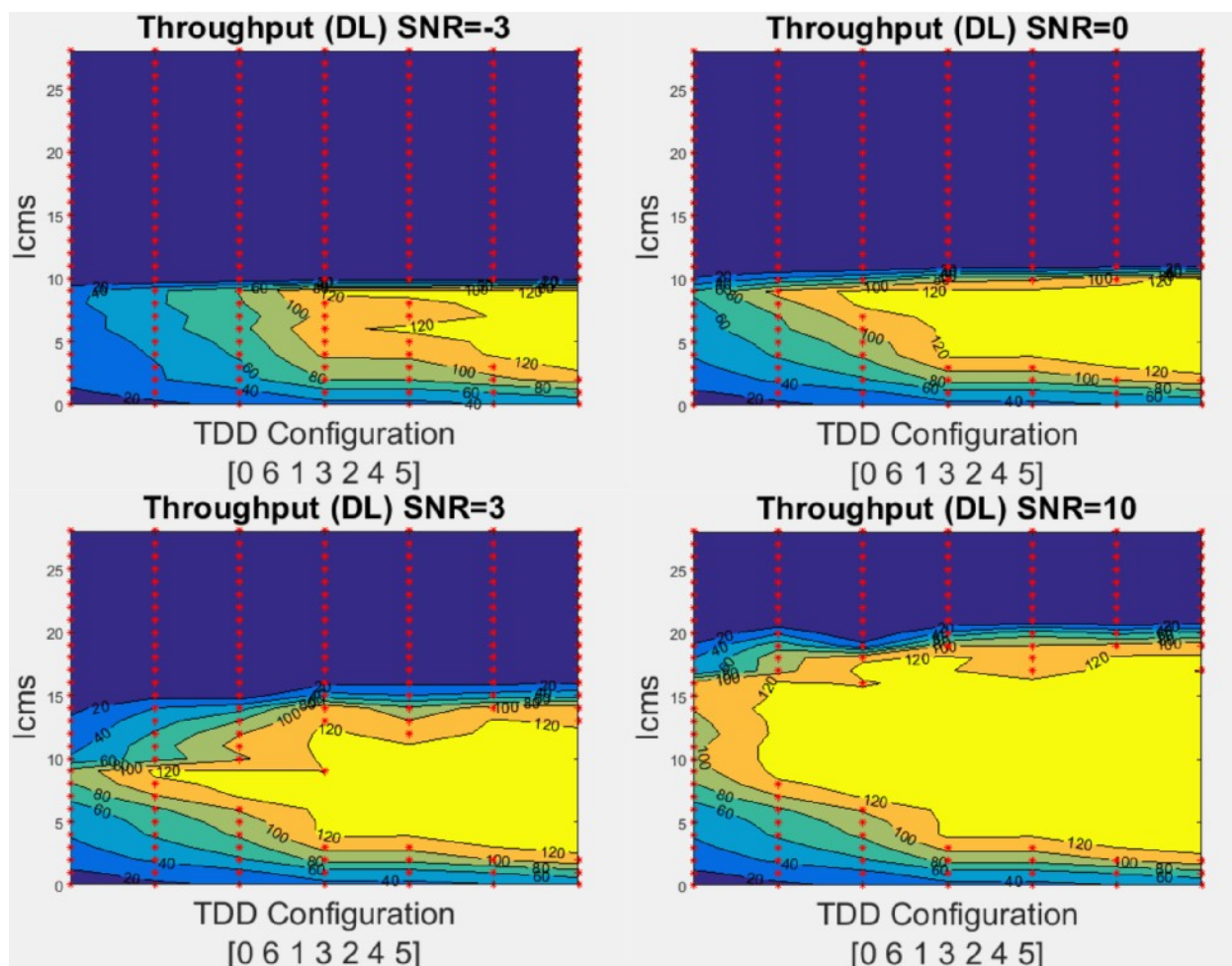
φρούρησης. Ο δείκτης TDD μπορεί να πάρει τιμές μεταξύ 0 και 6 και κάθε μία από αυτές αντιστοιχεί σε διαφορετικό πλήθος από υποπλαίσια κάθε κατηγορίας. Η διαμόρφωση με τον ελάχιστο λόγο καθοδικής προς ανοδική κίνησης είναι η 0 ενώ αυτή με το μέγιστο λόγο καθοδικής/προς ανοδική κίνηση είναι η 5 (Πίνακας 3.2). Οι τιμές του δείκτη δεν υποδηλώνουν κάποια διάταξη σε σχέση με το λόγο αυτό. Ωστόσο, για μεγαλύτερη σαφήνεια, σε όλα τα διαγράμματα που περιλαμβάνονται στα πλαίσια αυτής της εργασίας, οι τιμές έχουν υποστεί μετάθεση ώστε να διατηρείται η διάταξη κατά αύξουσα φορά λόγου καθοδικής/ανοδικής κίνησης.

Τόσο για την τιμή για τον συντελεστή TDD, όσο και του Icms υπάρχει ένας συγκεκριμένος παραγόντων που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον καθορισμό της βέλτιστης τιμής. Στην περίπτωση του συντελεστή TDD αυτό είναι σαφές. Τιμές που προβλέπουν μεγάλο λόγο ανοδικής/καθοδικής κίνησης έχουν ως αποτέλεσμα μικρή καθυστέρηση για τα δεδομένα που αποστέλλονται από τον χρήστη στο δίκτυο, ενώ το αντίθετο ισχύει για την περίπτωση λειτουργίας σε χαμηλό λόγο ανοδικής και καθοδικής κίνησης. Επειδή, γενικά, ενδιαφέρει τόσο η καθυστέρηση στην καθοδική, όσο και στην ανοδική κίνηση, συχνά η βέλτιστη τιμή επιτυγχάνεται για μία ενδιάμεση του συντελεστή TDD.

Από την άλλη, χαμηλές τιμές του Icms υποδηλώνουν μικρή ποσότητα ωφέλιμων δεδομένων που μεταδίδονται σε κάθε υποπλάσιο και συνεπάγονται χαμηλή αποδοτικότητα της μετάδοσης. Στο άλλο άκρο, υπερβολική αύξηση της ποσότητας των δεδομένων που ανατίθενται σε ένα φυσικό μπλοκ πόρων, καθιστούν δυσκολότερη την ορθή λήψη των δεδομένων αυτών παρουσία θορύβου και συνεπάγονται την ανάγκη για επαναμετάδοσή τους. Επομένως, ο καθορισμός των βέλτιστων τιμών των δύο αυτών παραμέτρων δεν είναι τετριμμένος και αποτελεί ένα από τα ερωτήματα με τα οποία ασχολείται η παρούσα εργασία.

Στο Σχήμα 6.1 φαίνεται η παρατηρούμενη ρυθμαπόδοση για καθοδική κίνηση και για τέσσερις διαφορετικούς λόγους σήματος προς θόρυβο. Καθώς στα πλαίσια του μοντέλου που μελετάται, τα χαρακτηριστικά της κίνησης μεταξύ eNodeB-χρηστών

είναι δεδομένα (μέση τιμή χρόνου μεταξύ αφίξεων και μεγέθους εισερχομένων πακέτων δεδομένων), η ρυθμαπόδοση που πρέπει να εξυπηρετηθεί από το δίκτυο είναι επίσης δεδομένη. Για τα διαγράμματα του σχήματος, ο ρυθμός με τον οποίον καταφθάνουν δεδομένα, τόσο για καθοδική όσο και ανοδική κίνηση, είναι 125 kbps. Τα ζεύγη τιμών I_{cms}/TDD για τα οποία η υπολογιζόμενη ρυθμαπόδοση υπολείπεται αυτής της τιμής, αντιστοιχούν σε μη επιθυμητές συνθήκες. Για αυτές, η εισερχόμενη κίνηση δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί και η καθυστέρηση των πακέτων προς μετάδοση στα buffer εισόδου, αυξάνει χωρίς όριο. Τα σημεία αυτά σημειώνονται με κόκκινους αστερίσκους, τόσο στα διάγραμματα ρυθμαπόδοσης, όσο και στα υπόλοιπα διαγράμματα. Σε όλες τις περιπτώσεις αυτές οι τιμές δεν αποτελούν αποδεκτά σημεία λειτουργίας (για μεγάλα χρονικά διαστήματα τουλάχιστον).

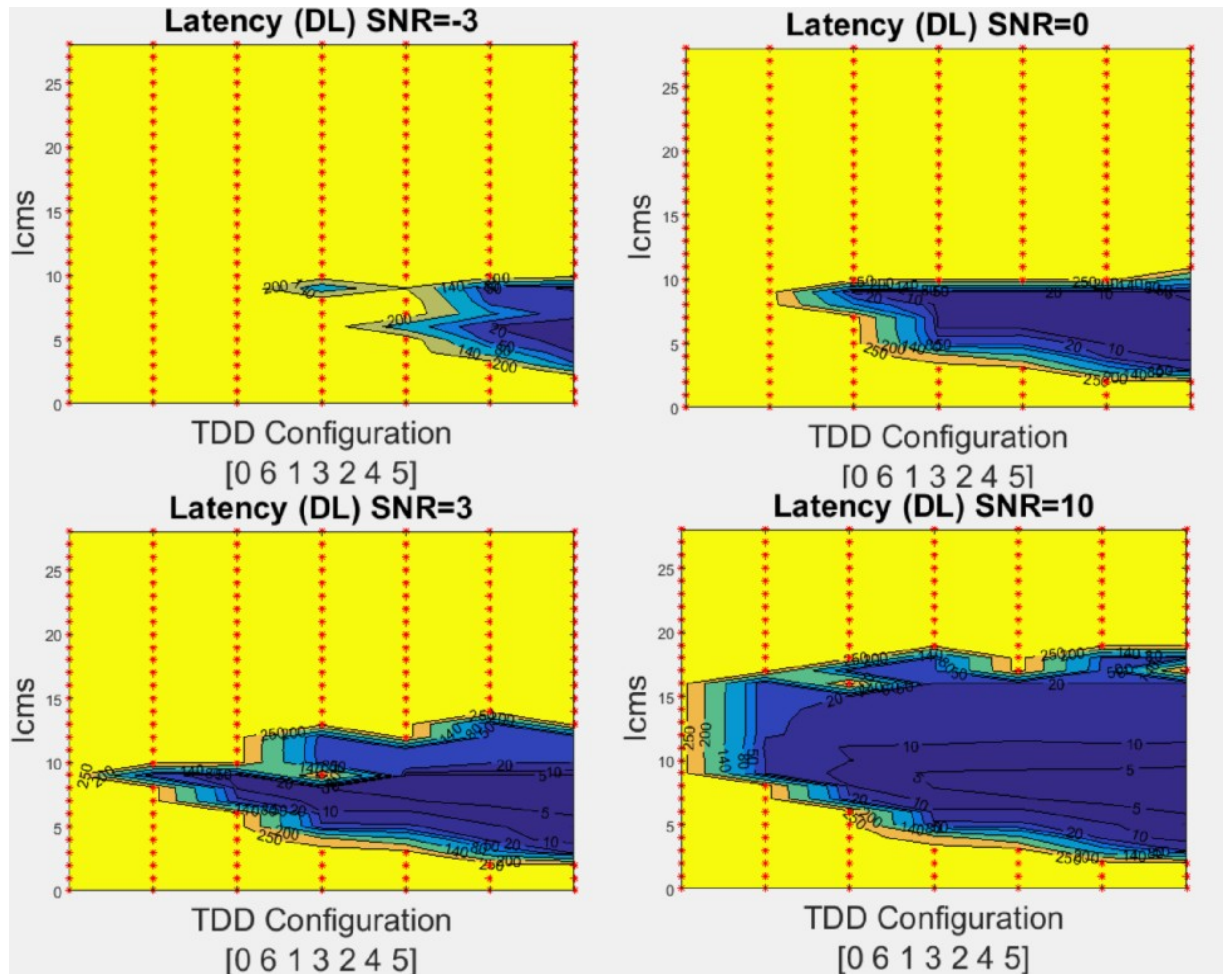


Σχήμα 6.1: Καθοδική ρυθμαπόδοση για SNR=-3, 0, 3 και 10 dB.

Οι τιμές της συνολικής καθοδικής ρυθμαπόδοσης εμφανίζουν μία κανονικότητα. Επιθυμητές τιμές για τον I_{cms} είναι γενικά ενδιάμεσες τιμές. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μικρές τιμές οδηγούν σε αναποτελεσματική αξιοποίηση των πόρων, ενώ οι υψηλές συνεπάγονται μεγάλη πιθανότητα ανεπιτυχών μεταδόσεων με αρνητικό αντίκτυπο στο συνολικά παρατηρούμενο ρυθμό μετάδοσης. Από την άλλη, επιτρεπτές τιμές για τον δείκτη TDD στο σχήμα 6.1 είναι γενικά οι τιμές στο δεξιό μέρος του διαγράμματος που αναφέρονται (μετά τη μετάθεση) σε υψηλό λόγο καθοδικής/ανοδικής κίνησης.

Μελετώντας την επίδραση του SNR παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο SNR, τόσο ευρύτερο είναι το πεδίο τιμών I_{cms} -TDD που επιτρέπει την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου για τη δεδομένη κίνηση. Η επιτρεπτή περιοχή λειτουργίας αντιστοιχεί στα διαγράμματα του Σχήματος 6.1 με το κίτρινο χρώμα. Στην περίπτωση κακών συνθηκών για το δίκτυο, δηλαδή για $SNR=-3$ και $SNR=0$, παρατηρείται ότι η τιμή $I_{cms}=10$, αποτελεί σύνορο μεταξύ αποδεκτής και μη αποδεκτής περιοχής λειτουργίας του συστήματος. Η τιμή αυτή δεν είναι τυχαία, αλλά αντιστοιχεί στην αλλαγή της τάξης της διαμόρφωσης από 2 bits/σύμβολο (QPSK) σε 4 bits/σύμβολο (16-QAM) σύμφωνα με το πρότυπο [7]. Σε συνθήκες χαμηλού λόγου σήματος προς θόρυβο η αλλαγή αυτή δεν μπορεί να υποστηριχθεί. Αντίθετα στις περιπτώσεις όπου ο SNR είναι 3 ή 10, υπάρχουν αρκετά σημεία κανονικής λειτουργίας με $I_{cms}>9$.

Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές της καθυστέρησης για τις ίδιες παραμέτρους με το σχήμα 6.1. Οι σκούρες αποχρώσεις αντιστοιχούν σε μικρότερες, και επομένως περισσότερο επιθυμητές, τιμές. Οι καθυστερήσεις αυτές περιλαμβάνουν το χρόνο που απαιτείται από τη στιγμή που καταφθάνουν δεδομένα για μετάδοση (είτε καθοδική, είτε ανοδική) μέχρι τη στιγμή που λαμβάνονται επιτυχώς στο άλλο άκρο της επικοινωνίας. Επομένως, ο συνολικός χρόνος μπορεί να περιλαμβάνει τους χρόνους για την ολοκλήρωση περισσότερων από μία μεταδόσεις του ίδιου μπλοκ από δεδομένα.



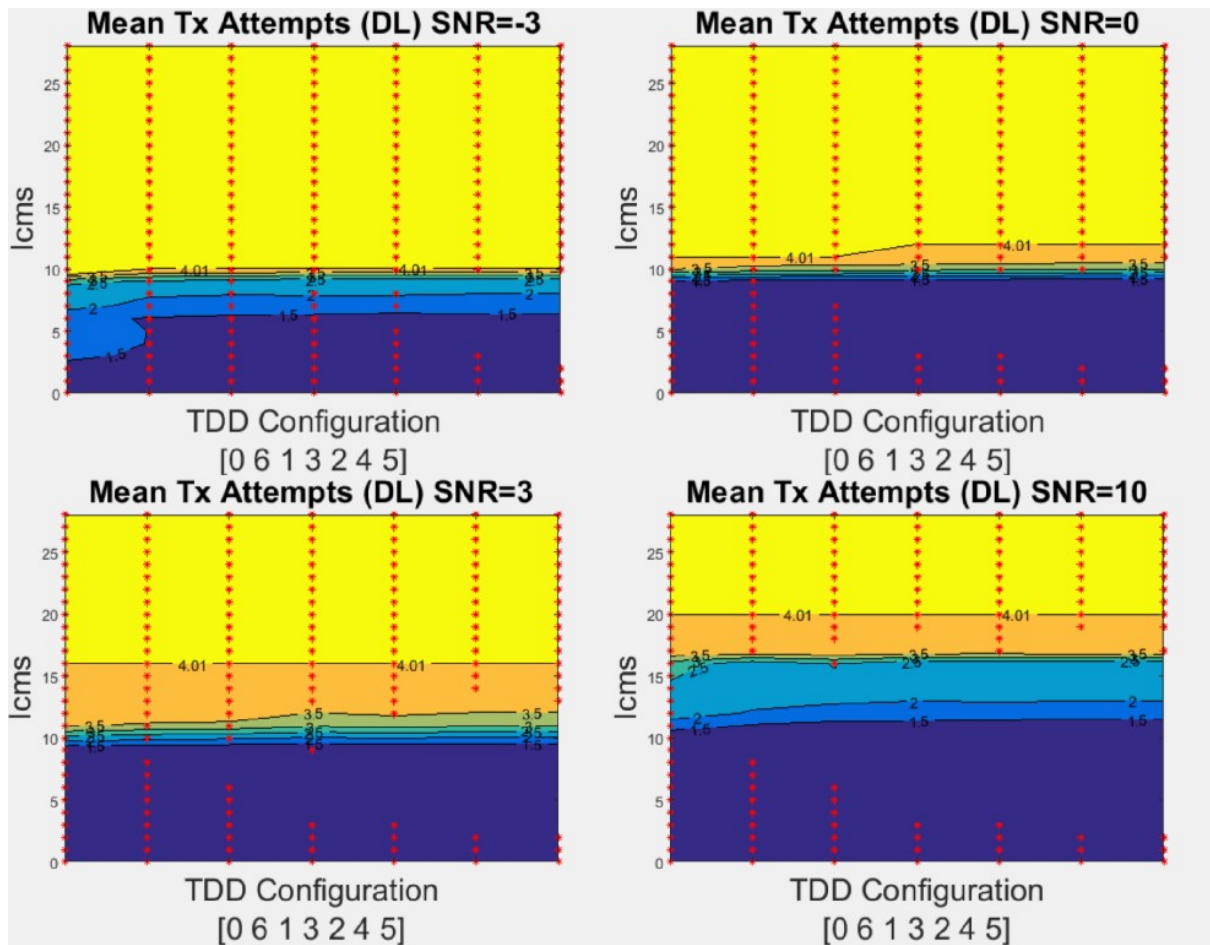
Σχήμα 6.2: Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο για καθοδική κίνηση (SNR=-3, 0, 3, 10 dB).

Και σε αυτήν την περίπτωση οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας είναι σε ενδιάμεσες τιμές του συντελεστή Icms (δηλαδή ενδιάμεσους λόγους κωδικοποίησης) και ακραίες τιμές του λόγου του αριθμού των καθοδικών/ανοδικών υποπλαισίων. Από την άλλη, ο SNR έχει επίπτωση τόσο στη θέση εμφάνισης της ελάχιστης καθυστέρησης, αλλά και στην απόλυτη τιμή που αυτή λαμβάνει. Για χαμηλούς SNR, οι ελάχιστες τιμές που επιτυγχόνονται είναι της τάξης των 20 ms (SNR=-3) και των 10 ms. Αντίθετα, οι βέλτιστες καθυστερήσεις που επιτυγχάνονται για την περίπτωση των SNR=3 και

SNR=10 είναι μικρότερες από 5 ms. Η παρατήρηση αυτή είναι αναμενόμενη. Όσο καλύτερες συνθήκες θορύβου επικρατούν, τόσο μεγαλύτεροι ρυθμοί μετάδοσης μπορούν να υποστηριχθούν. Έτσι, οι καθυστερήσεις είναι μικρότερες.

Στο Σχήμα 6.3 απεικονίζεται ο μέσος αριθμός μεταδόσεων για κάθε πακέτο δεδομένων. Σύμφωνα με το πρότυπο για το LTE, αν κάποιο μπλοκ δεδομένων δε ληφθεί με επιτυχία, τότε η αντίστοιχη HARQ διεργασία αναλαμβάνει την εκ νέου αποστολή του. Ο μέγιστος προβλεπόμενος ρυθμός μεταδόσεων είναι τέσσερις. Αν ακόμη και κατά την τέταρτη μετάδοση η λήψη είναι ανεπιτυχής, το πακέτο απορρίπτεται. Στον υπολογισμό του μέσου όρου μεταδόσεων, έχουν εξαιρεθεί τα πακέτα που έχουν απορριφθεί. Επομένως, οι δυνατές τιμές που μπορεί να πάρει είναι μεταξύ 1 και 4. Στο Σχήμα 6.3 οι κίτρινες περιοχές αντιστοιχούν στις περιπτώσεις όπου κανένα πακέτο δεν ελήφθη επιτυχώς. Αντίθετα οι σκούρες μπλε περιοχές αντιστοιχούν σε συνθήκες όπου τα δεδομένα ελήφθησαν επιτυχώς με την πρώτη προσπάθεια, δηλαδή σε ένα μέσο αριθμό μεταδόσεων κοντά στο 1.

Από τα διαγράμματα είναι χαρακτηριστική η έλλειψη της επίδρασης του συντελεστή TDD στο μέσο αριθμό μεταδόσεων. Η πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης ενός πακέτου δεδομένων εξαρτάται από την ποσότητα δεδομένων που μεταδίδονται (επομένως από τον I_{cmts}), το φυσικό ρυθμό μετάδοσης και το λόγο σήματος προς θόρυβο. Από αυτές τις τρεις παραμέτρους, η μόνη επίδραση που έχει η επιλογή μίας συγκεκριμένης λειτουργίας TDD, είναι πάνω στο φυσικό ρυθμό μετάδοσης και είναι μικρή. Συγκεκριμένα, τα καθοδικά πλαίσια δεν υποστηρίζουν όλα τον ίδιο φυσικό ρυθμό μετάδοσης. Για παράδειγμα, για το υποπλαίσιο 0 μέρος των πόρων αναλώνονται στη μετάδοση του πρωτεύοντος σήματος συγχρονισμού, έχοντας ως συνέπεια λιγότερους διαθέσιμους πόρους για χρήσιμα δεδομένα. Το υποπλαίσιο αυτό ανατίθεται σε καθοδικά δεδομένα για όλες τις τιμές του δείκτη TDD. Ωστόσο, καθώς το πλήθος συνολικά των ανοδικών πλαισίων διαφέρει, η επίδραση αυτού του μικρότερου ρυθμού μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο σημαντική. Αυτός είναι ο λόγος της μικρής απόκλισης που εμφανίζεται από την οριζόντια διάταξη των ισούψων γραμμών στην αριστερή πλευρά των διαγραμμάτων.



Σχήμα 6.3: Μέσο πλήθος απαιτούμενων μεταδόσεων για καθοδική κίνηση (SNR=-3, 0, 3, 10 dB).

Όσο υψηλότερος είναι ο SNR, τόσο μικρότερο είναι το πλήθος των μεταδόσεων. Ενδιαφέρον έχει ότι οι μεταβάσεις από τιμές των μέσων μεταδόσεων από τιμές κοντά στο 1 (σκούρο μπλε στα διαγράμματα) σε μεγαλύτερες τιμές (άλλα χρώματα) αντιστοιχούν στη μετάβαση για τον Icms από την τιμή 9, στην τιμή 10 (εξαίρεση σε αυτή την παρατήρηση αποτελεί το διάγραμμα για SNR=10). Σύμφωνα με το πρότυπο, σε αυτή τη μετάβαση, αλλάζει και η διαμόρφωση στα καθοδικά δεδομένα από QPSK σε 16-QAM. Στην περίπτωση του SNR=3, η αλλαγή αυτή οδηγεί μεν σε αύξηση του πλήθους των απαιτούμενων επαναμεταδόσεων, αλλά δε συνεπάγεται

κατ' ανάγκη και αδυναμία υποστήριξης μεγαλύτερων ρυθμών κωδικοποίησης (μεγαλύτερων τιμών I_{cms}). Αντίθετα, στις περιπτώσεις των $SNR=0$ και $SNR=-3$, η μετάβαση αυτή αποτελεί το όριο μεταξύ πλήρως επιτυχημένων μεταδόσεων (σκούρα περιοχή, μέσος αριθμός μεταδόσεων περίπου 1), σε πλήρως αποτυχημένες μεταδόσεις (κίτρινη περιοχή, αποτυχημένη λήψη μετά από 4 μεταδόσεις). Τέλος, για καλές συνθήκες του δικτύου η διαμόρφωση 16-QAM μπορεί να υποστηριχθεί ακόμη και για μεγαλύτερες τιμές του I_{cms} (αν και αυτό απαιτεί περισσότερες μεταδόσεις).

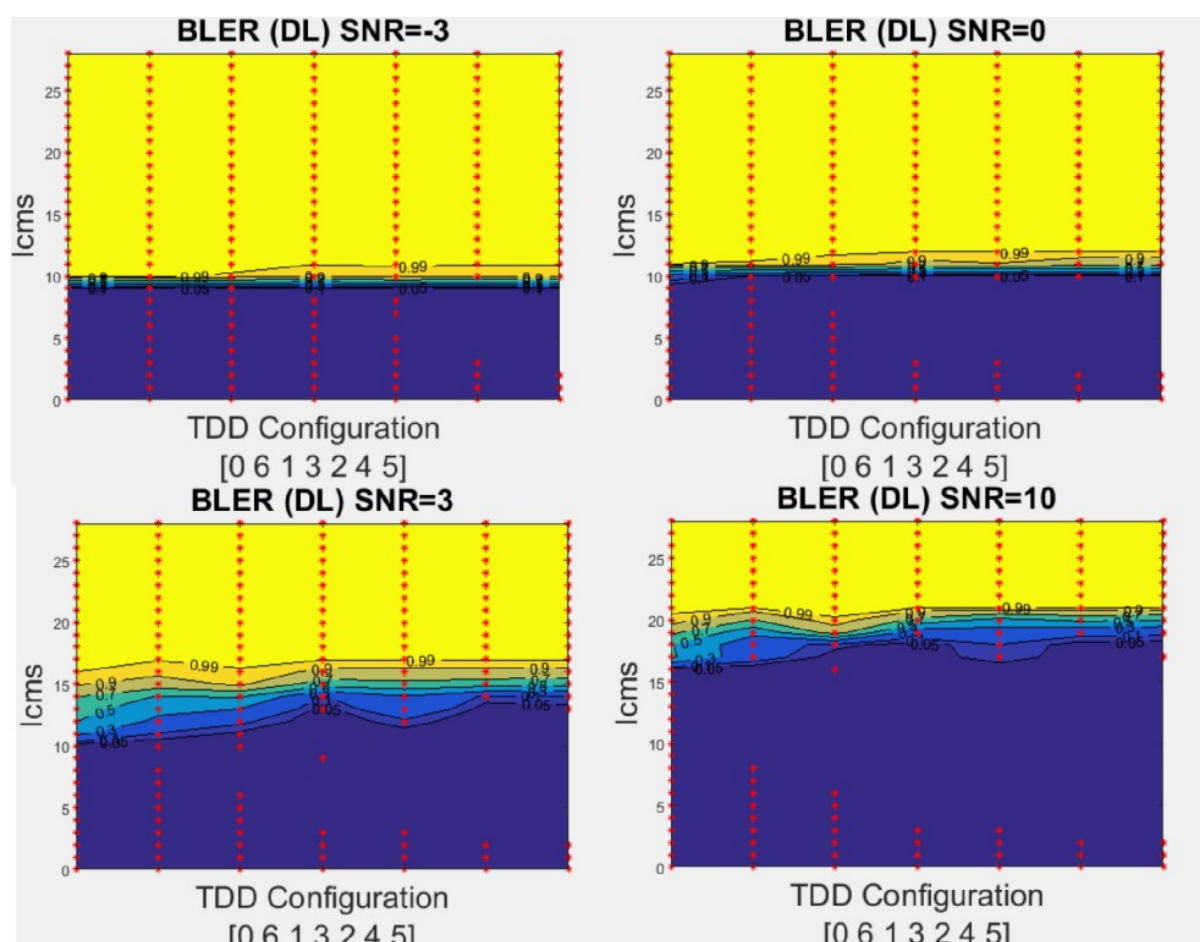
Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζονται οι τιμές του λόγου απόρριψης (λόγος σφάλματος μπλοκ, BLER). Απόρριψη ενός πακέτου πραγματοποιείται όταν δεν έχει καταστεί επιτυχής η χωρίς σφάλματα λήψη των δεδομένων μετά από τέσσερις μεταδόσεις. Ο BLER είναι ο λόγος των πακέτων που απορρίφθηκαν προς τα συνολικά πακέτα που μεταδόθηκαν. Αποτελεί επομένως μία μετρική που αναφέρεται στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων και όχι στο φυσικό επίπεδο. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτός ο ορισμός διαφέρει από τη χρήση του όρου σε αρκετές εργασίες στην επιστημονική βιβλιογραφία.

Σε συμφωνία με τα διαγράμματα του μέσου πλήθους μεταδόσεων (σχήμα 6.3), ο BLER επίσης δεν παρουσιάζει σημαντική εξάρτηση από τη συγκεκριμένη λειτουργία TDD που επιλέγεται. Στην περίπτωση κακών συνθηκών του δικτύου ($SNR=-3$, $SNR=0$), η εναλλαγή μεταξύ επιτυχημένων και αποτυχημένων μεταδόσεων είναι μία όλα-ή-τίποτε διεργασία: Για χαμηλούς ρυθμούς κωδικοποίησης η μετάδοση είναι πάντα επιτυχημένη, ενώ για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης αποτυχημένη. Η διαχωριστική τιμή μεταξύ των δύο αυτών περιοχών είναι μεταξύ των τιμών I_{cms} 9-10, όπως και για το μέσο αριθμό μεταδόσεων που περιγράφηκε παραπάνω.

Αντίθετα, στην περίπτωση των $SNR=3$ και $SNR=10$, η μετάβαση από $BLER=0$ σε $BLER=1$ είναι πιο ομαλή, καθώς υπάρχουν σημεία λειτουργίας με ενδιάμεσες τιμές BLER. Η κίτρινη περιοχή στα διαγράμματα αντιστοιχεί στις περιπτώσεις όπου όλες οι μεταδόσεις ήταν αποτυχημένες. Το μέρος αυτό των καταστάσεων λειτουργίας είναι σε αντιστοιχία με το ανάλογο μέρος των διαγραμμάτων του μέσου πλήθους

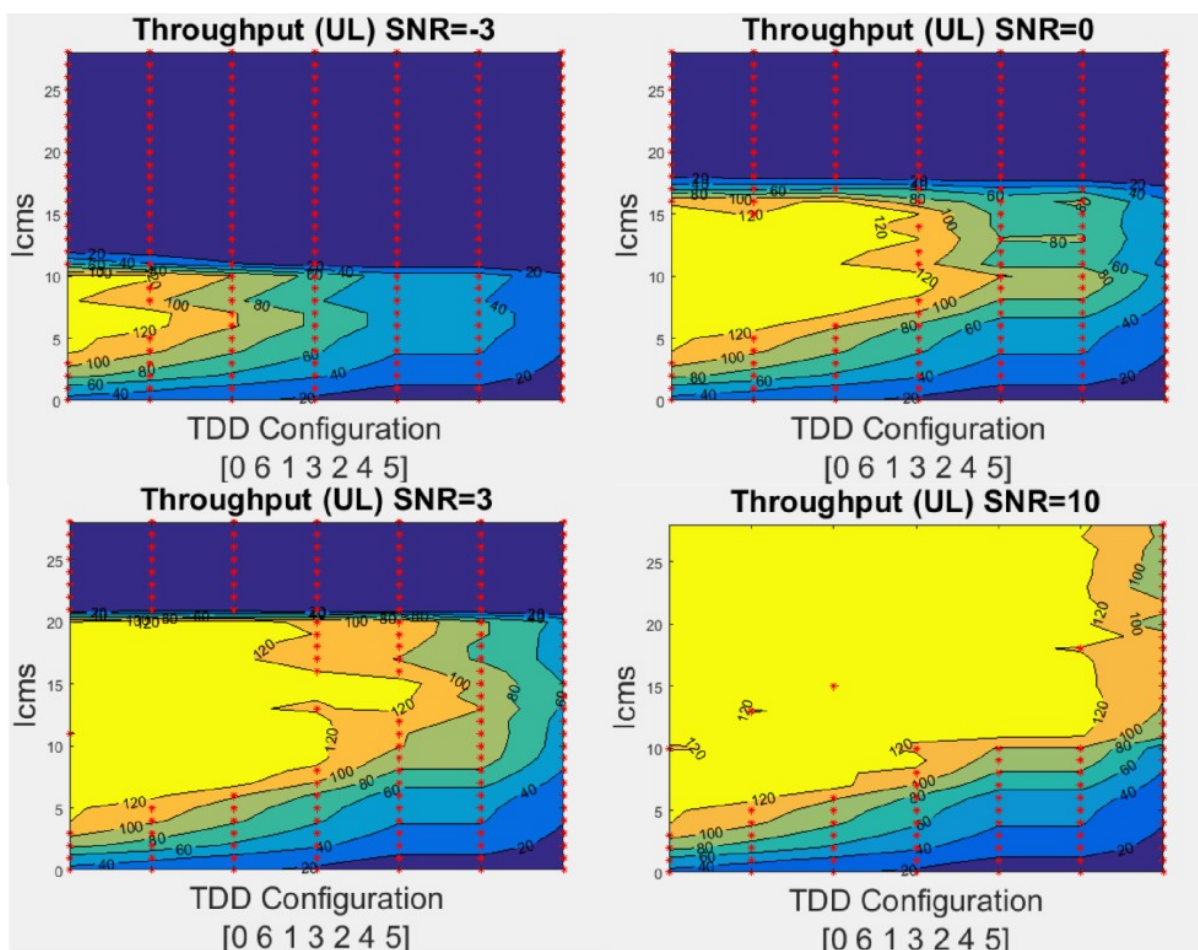
μεταδόσεων. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι στον υπολογισμό του μέσου πλήθους μεταδόσεων χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι επιτυχείς μεταδόσεις. Κατά συνέπεια, η μετρική αυτή δεν ορίζεται όταν ο BLER είναι ακριβώς 1.

Κατά την προσομοίωση, εξετάστηκαν παράλληλα η ανοδική και η καθοδική κίνηση. Τα αποτελέσματα για τη ρυθμαπόδοση, την καθυστέρηση, το μέσο ρυθμό μεταδόσεων και του BLER, για την περίπτωση της ανοδικής κίνησης δίνονται στα Σχήματα 6.5-6.8. Ένα γενικό σχόλιο που μπορεί να γίνει για την ανοδική κίνηση είναι ότι η επιτρεπόμενη (και η βέλτιστη) περιοχή λειτουργίας σε αυτή την περίπτωση περιλαμβάνει το αριστερό μέρος των διαγραμμάτων. Το τμήμα αυτό αντιστοιχεί στην ανάθεση περισσότερων υποπλαισίων σε ανοδική κίνηση.



Σχήμα 6.4: Λόγος απόρριψης πακέτων για καθοδική κίνηση (SNR=-3, 0, 3, 10 dB).

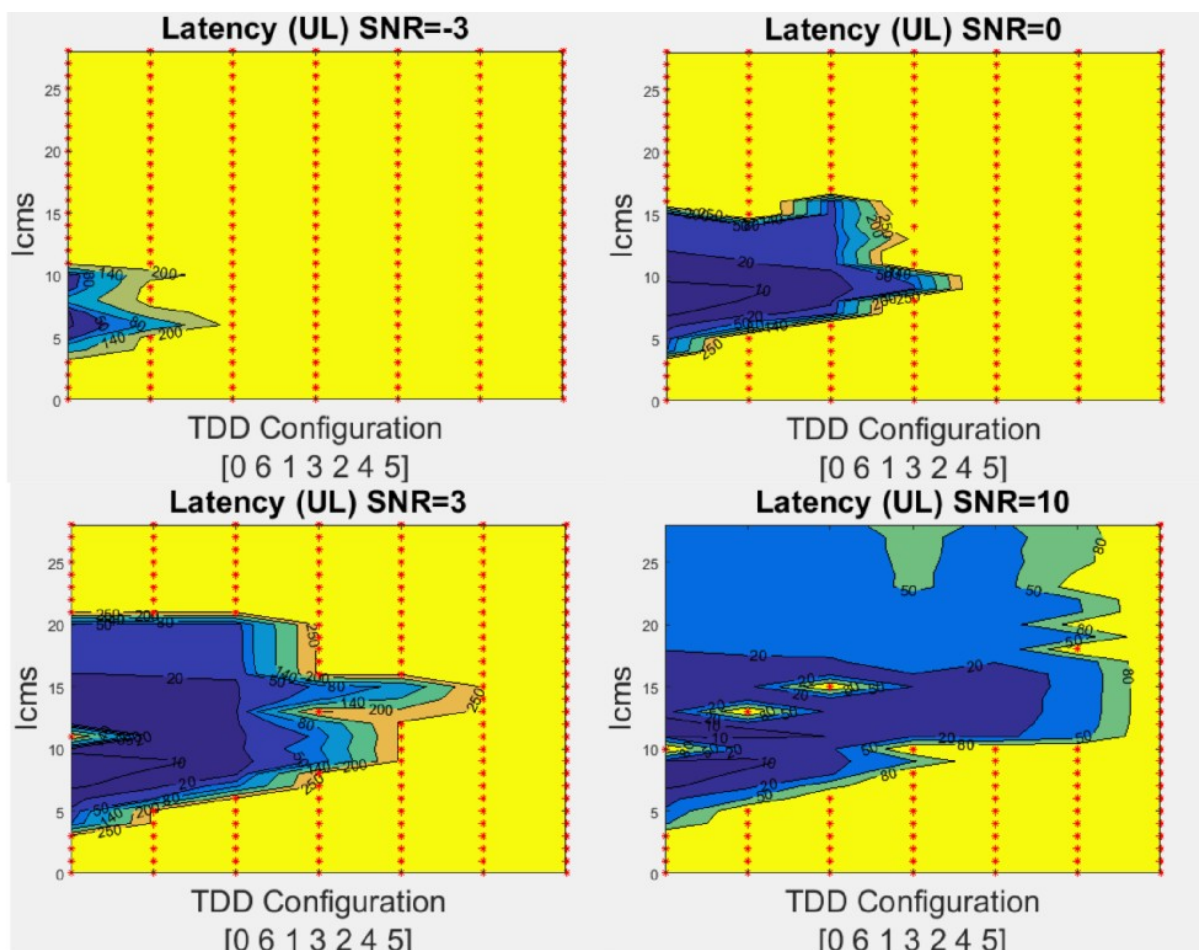
Συγκρίνοντας τα διαγράμματα ρυθμαπόδοσης για την ανοδική και την καθοδική κίνηση παρατηρείται ότι γενικά το εύρος των διαθέσιμων συνθηκών λειτουργίας είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση της ανοδικής κίνησης για την ίδια ποσότητα δεδομένων και τον ίδιο λόγο σήματος προς θόρυβο. Ένας λόγος για αυτό είναι και σε αυτή την περίπτωση, η μειωμένη δυναμικότητα σε χρήσιμα δεδομένα κάποιων καθοδικών πλαισίων εξαιτίας της ύπαρξης σημάτων ελέγχου που πρέπει να μεταδοθούν σε αυτά. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το υποπλαίσιο 0 περιλαμβάνει το πρωτεύον σήμα συγχρονισμού και η συνολική του δυναμικότητα είναι σημαντικά μικρότερη από τα υπόλοιπα (136 bits έναντι 252 bits ανά μπλοκ πόρων). Το ίδιο ισχύει σε μικρότερο βαθμό και για το υποπλαίσιο 5 που περιέχει το δευτερεύον σήμα συγχρονισμού (228



Σχήμα 6.5: Ανοδική ρυθμαπόδοση για SNR=-3, 0, 3 και 10 dB.

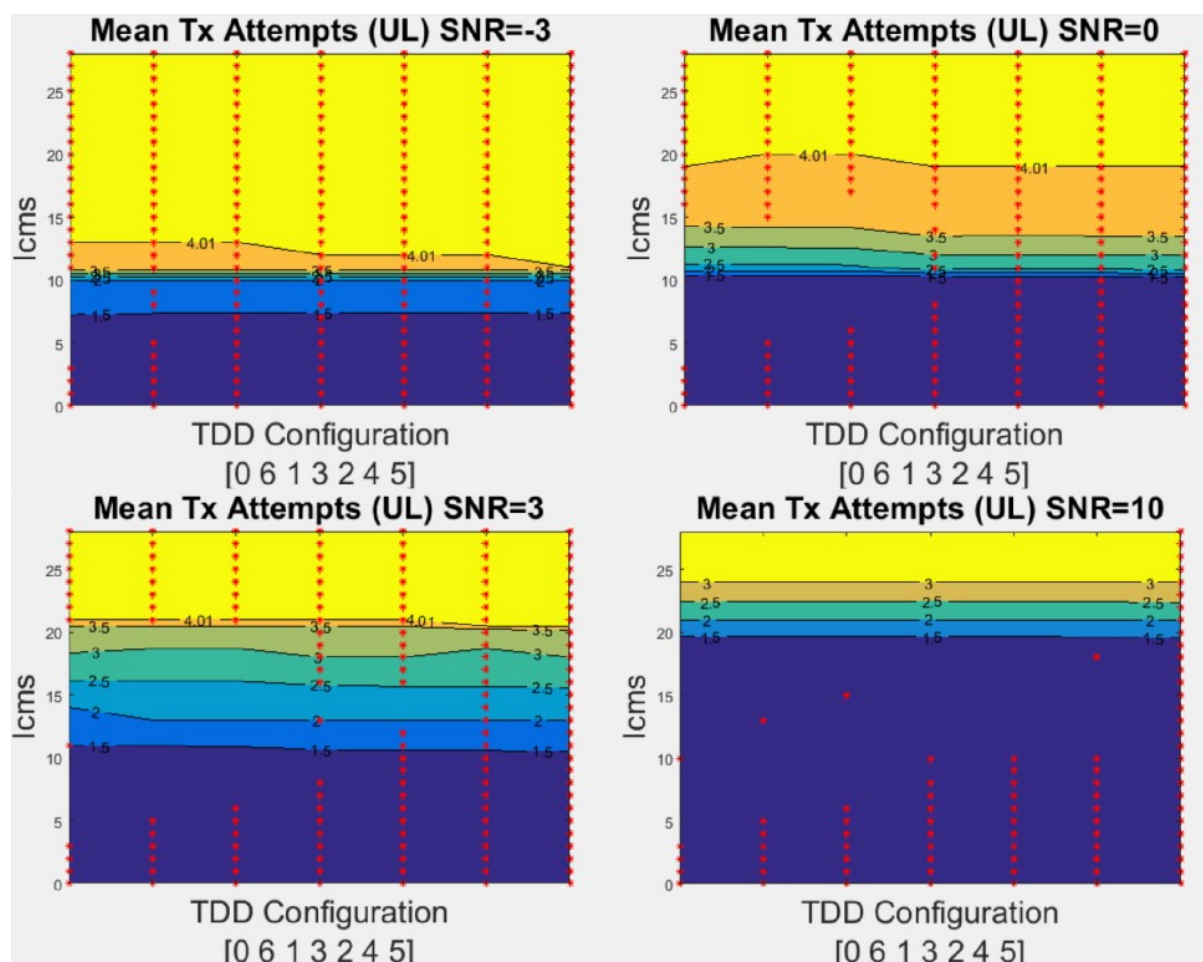
bits έναντι 252 bits). Και τα δύο αυτά υποπλαίσια ανατίθενται πάντα σε καθοδική κίνηση. Αν και οι παραπάνω παρατηρήσεις ισχύουν γενικά, η επιτρεπτή περιοχή λειτουργίας σχετίζεται άμεσα με την εισερχόμενη κίνηση και επομένως σε περιπτώσεις μη ισορροπημένης ανοδικής/καθοδικής κίνησης είναι δυνατόν το μέγεθος του χώρου λειτουργίας να διαφέρει.

Σε σχέση με το μέσο πλήθος μεταδόσεων (Σχήμα 6.7), όπως και στην περίπτωση της καθοδικής κίνησης, οι ισούψεις είναι επίσης οριζόντιες. Συγκρίνοντας, ωστόσο, τις τιμές του μέσου πλήθους μεταδόσεων μεταξύ ανοδικής και καθοδικής κίνησης για τις ίδιες τιμές I_{cms} , δείκτη TDD και I_{cms} , στην ανοδική κίνηση απαιτούνται γενικά



Σχήμα 6.6: Καυστέρηση από άκρο σε άκρο για ανοδική κίνηση (SNR=-3, 0, 3, 10 dB).

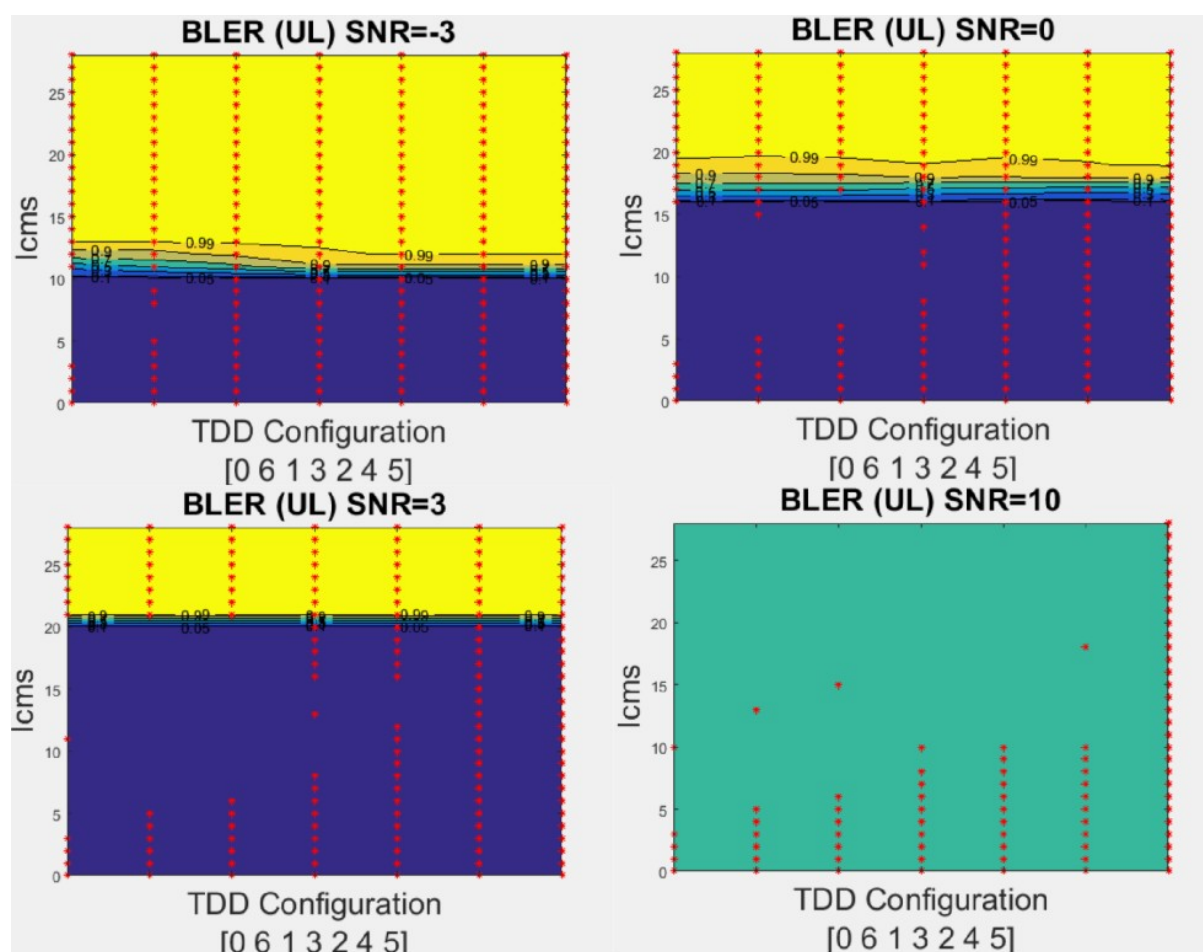
λιγότερες μεταδόσεις. Ο βασικός λόγος για αυτό είναι ο μεγαλύτερος φυσικός ρυθμός μετάδοσης που αντιστοιχεί στα ανοδικά, καθώς αυτά μεταφέρουν λιγότερη πληροφορία ελέγχου.



Σχήμα 6.7: Μέσο πλήθος απαιτούμενων μεταδόσεων για ανοδική κίνηση (SNR=-3, 0, 3, 10 dB).

Στο Σχήμα 6.8 απεικονίζεται ο λόγος BLER για την περίπτωση της ανοδικής κίνησης. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση για SNR=10 dB, κατά την οποία όλα τα πακέτα δεδομένων ελήφθησαν επιτυχώς (με κάποια από αυτά να απαιτούν ενδεχομένως περισσότερες από μία μεταδόσεις). Στην περίπτωση αυτή ο BLER είναι σταθερός και ίσος με 0 και επομένως δεν έχει νόημα η δημιουργία ενός διαγράμματος ισοϋψών.

Οι μεταβάσεις μεταξύ των περιοχών με πλήρως επιτυχημένες μεταδόσεις (σκούρες μπλε περιοχές, BLER=0) και των περιοχών απόρριψης όλων των πακέτων (κίτρινες περιοχές, BLER=1) είναι αρκετά απότομες. Στην περίπτωση μάλιστα για SNR=3, η μετάβαση είναι απόλυτη. Δεν υπάρχουν σημεία λειτουργίας όπου ο παρατηρούμενος BLER να μην έχει ακραία τιμή (0 ή 1).



Σχήμα 6.8: Λόγος απόρριψης πακέτων για καθοδική κίνηση (SNR=-3, 0, 3, 10 dB).

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω εστιάζουν είτε στην καθοδική είτε την ανοδική κίνηση. Παρόλο που η διχοτομία αυτή είναι χρήσιμη, ώστε να αναλυθεί η

λειτουργία του LTE και να εξαχθούν συμπεράσματα και γενικεύσεις, πρακτικά συνήθως ενδιαφερόμαστε και για τις δύο κατευθύνσεις της κίνησης. Για την ταυτόχρονη μελέτη ανοδικής/καθοδικής κίνησης, εισάγεται ως λειτουργική μετρική για τη ρυθμαπόδοση και την καθυστέρηση, η τιμή που προκύπτει από τη γεωμετρική παρεμβολή μεταξύ των τιμών για κάθε κατεύθυνση. Συγκεκριμένα, αν P_{UL} η ρυθμαπόδοση για την ανοδική κίνηση και P_{DL} η ρυθμαπόδοση για την καθοδική για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας τότε η σταθμισμένη ρυθμαπόδοση ορίζεται ως

$$P = P_{DL}^{\gamma} P_{UL}^{1-\gamma} \quad (1)$$

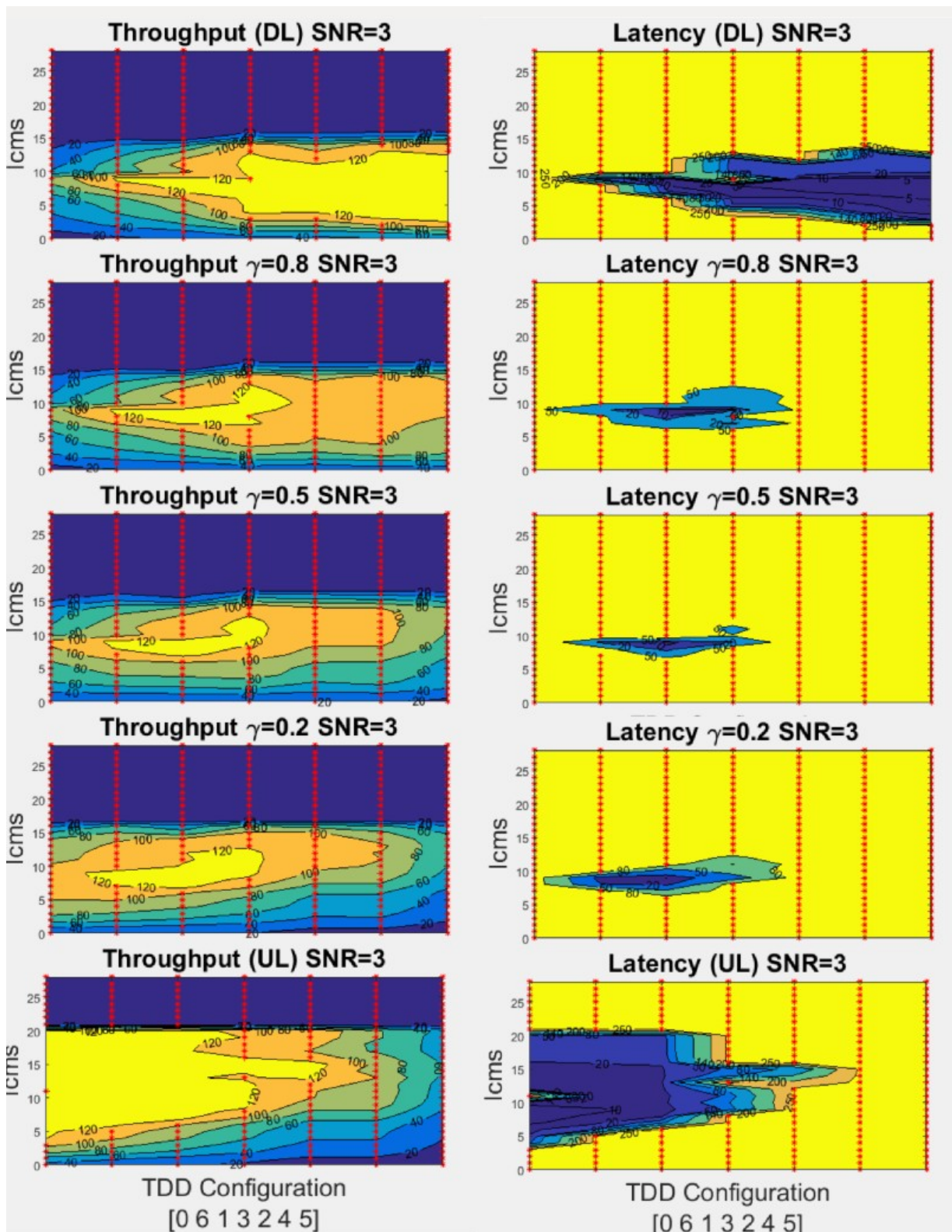
με γ ένα συντελεστή στάθμισης $0 < \gamma < 1$. Για $\gamma=1$ η σταθμισμένη τιμή ταυτίζεται με τη ρυθμαπόδοση για πλήρως καθοδική κίνηση, ενώ για $\gamma=0$ με την ανοδική.

Ομοίως ορίζεται η σταθμισμένη τιμή για την καθυστέρηση ως:

$$L = L_{DL}^{\gamma} L_{UL}^{1-\gamma} \quad (2)$$

Ο λόγος που επιλέχθηκε η γεωμετρική αντί της γραμμικής παρεμβολής είναι ότι αυτή δεν είναι ευαίσθητη στις απόλυτες τιμές των P_{DL} και P_{UL} , αλλά μόνο στις σχετικές αυξήσεις/μειώσεις. Η τιμή $\gamma=0.5$ προσδίδει την ίδια βαρύτητα σε ανοδική και καθοδική κίνηση και αποτελεί τη μετρική που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία αν δεν αναφέρεται κάτι άλλο.

Καθώς οι σταθμισμένες τιμές εξαρτώνται τόσο από τις τιμές για την καθοδική όσο και την ανοδική κίνηση, το μέρος του χώρου λειτουργίας όπου ορίζονται οι ενδιάμεσες τιμές είναι η τομή των χωρίων λειτουργίας για κάθε κατεύθυνση κίνησης. Με δεδομένο ότι κατάλληλες τιμές για τον δείκτη TDD είναι οι τιμές δεξιά των διαγραμμάτων, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για ανοδική κίνηση είναι οι τιμές αριστερά, για τη σταθμισμένη κίνηση κατάλληλες τιμές του δείκτη TDD, είναι αυτές που βρίσκονται στο μέσο των διαγραμμάτων.



Σχήμα 6.9: Σταθμισμένη ρυθμαπόδοση και καθυστέρηση.

Από το Σχήμα 6.9 προκύπτει ότι η τιμή του συντελεστή γ δεν έχει σημαντικό αντίκτυπο στον καθορισμό των δυνατών σημείων λειτουργίας. Παρόλα αυτά υπάρχει μία μικρή μετατόπιση του πεδίου λειτουργίας προς τα δεξιά καθώς αυξάνει το γ . Πρέπει να σημειωθεί πάντως, ότι τα διαγράμματα αυτά ελήφθησαν για ισορροπημένη κίνηση. Από την άλλη, σε σχέση με τις τιμές και όχι τη θέση της βέλτιστης λειτουργίας, παρατηρείται μία μείωση των καθυστερήσεων με την αύξηση του γ .

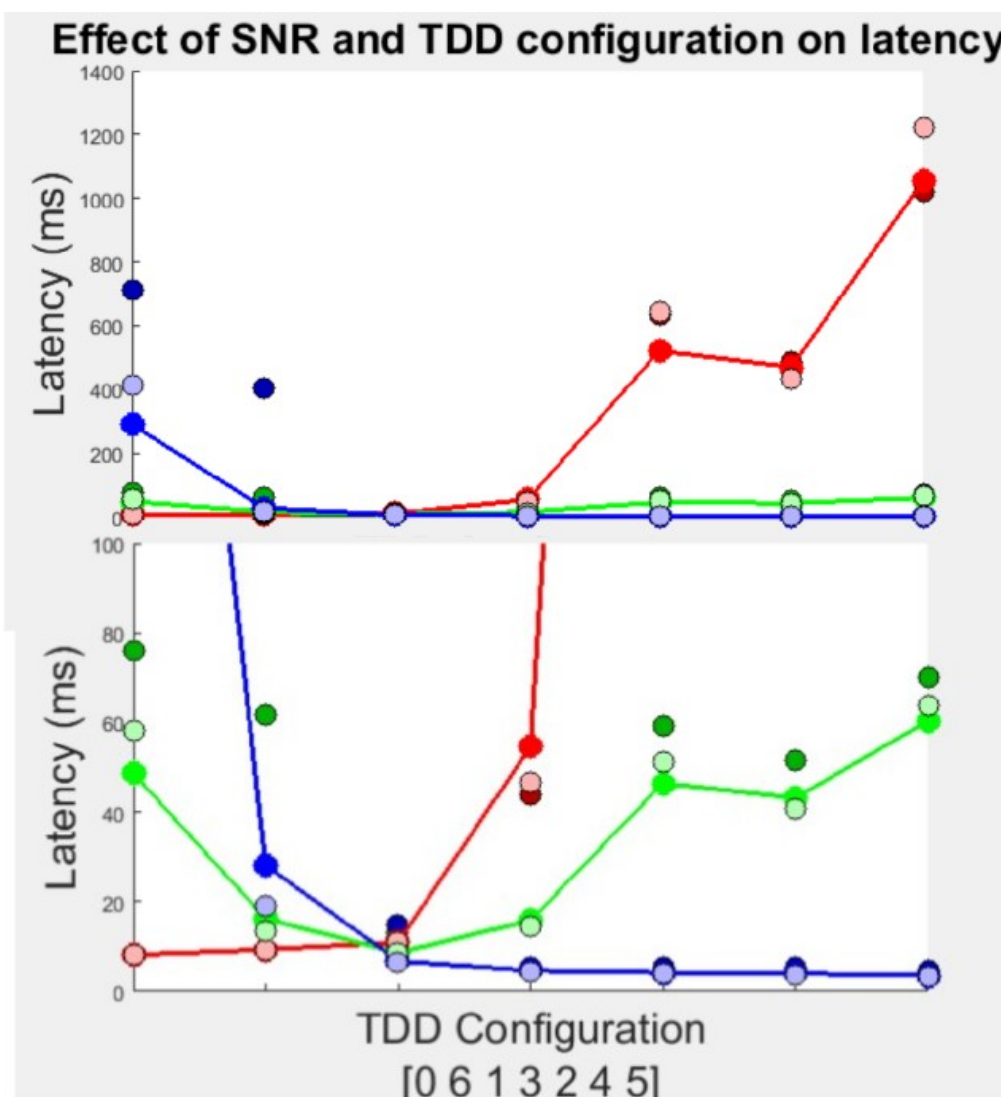
Τα διαγράμματα ισοϋψών είναι εύχρηστα για τη συνολική εποπτεία των μεταβολών των τιμών ενός μεγέθους που εξαρτάται από δύο μεταβλητές. Ωστόσο καθιστούν δύσκολη την εξερεύνηση της ακριβούς επίδρασης κάθε μιας από αυτές τις μεταβλητές στη μετρική που εξετάζεται. Σε καθένα από τα διαγράμματα 6.10 και 6.11 λαμβάνεται μία τομή στο χώρο καταστάσεων, διατηρώντας σταθερή την τιμή ενός από τα I_{cms} και TDD και μεταβάλλοντας την άλλη.

Στο Σχήμα 6.10 εξετάζεται η επίδραση του συντελεστή TDD στην παρατηρούμενη καθυστέρηση. Στο μπλε χρώμα αντιστοιχεί η καθυστέρηση για την καθοδική κίνηση, στο κόκκινο η καθυστέρηση για την ανοδική και στο πράσινο η σταθμισμένη καθυστέρηση. Η τιμή του I_{cms} είναι σταθερή και ίση με 9, ενώ για κάθε είδους κίνηση (για κάθε χρώμα) παρουσιάζονται δεδομένα για $SNR=0$ (σημεία με ανοιχτό χρώμα), $SNR=3$ (σημεία με κανονικό χρώμα) και $SNR=10$ (σημεία σκούρο χρώμα). Για περισσότερη ευκρίνεια γραμμές περιλαμβάνονται μόνο για τα σημεία με $SNR=3$.

Το πάνω μέρος του Σχήματος 6.10 περιλαμβάνει όλα τα σημεία, κάποια από τα οποία εμφανίζουν πολύ υψηλές καθυστερήσεις και αντιστοιχούν σε μη επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας. Παρόλα αυτά οι μορφές των καμπυλών ακολουθούν την αναμενόμενη συμπεριφορά. Η καμπύλη για την καθοδική κίνηση αποτελεί μία φθίνουσα καμπύλη σε σχέση με τον αυξανόμενο δείκτη TDD, ενώ η καμπύλη για την ανοδική κίνηση είναι αύξουσα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η καμπύλη για τη σταθμισμένη καθυστέρηση να εμφανίζει ένα ελάχιστο στην τιμή της.

Το κάτω μέρος του διαγράμματος αποτελεί μία μεγέθυνση. Με τον περιορισμό των

καθυστερήσεων στα 100 ms έχουν αφαιρεθεί οι ακραίες τιμές που αντιστοιχούν σε προβληματικές καταστάσεις της λειτουργίας του δικτύου. Η μεγέθυνση επιτρέπει την καλύτερη εποπτεία της συμπεριφοράς των καθυστερήσεων και καθιστά εμφανές το ελάχιστο που εμφανίζει η σταθμισμένη καθυστέρηση.

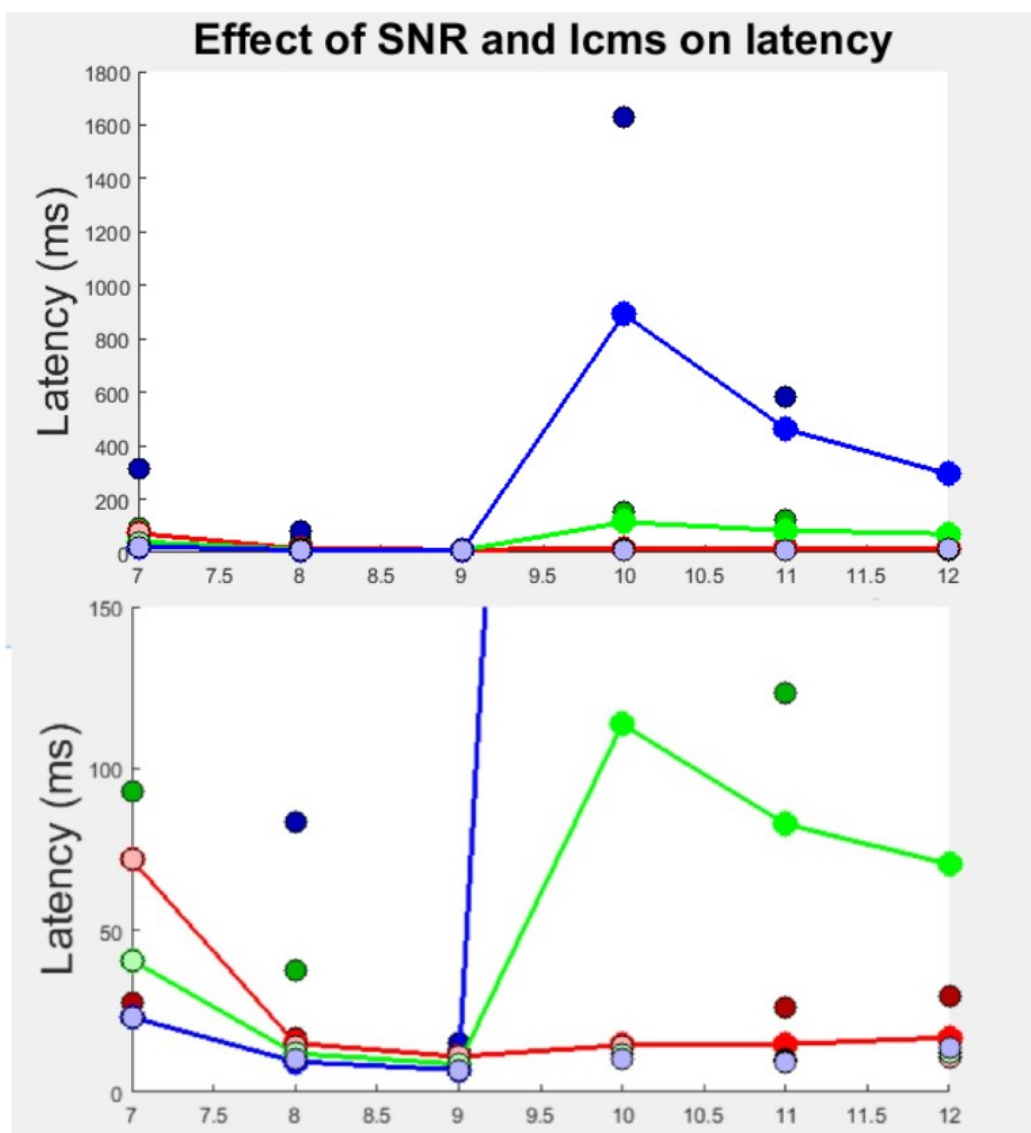


Σχήμα 6.10: Επίδραση του δείκτη TDD στην καθυστέρηση.

Στο ίδιο διάγραμμα απεικονίζεται και η επίδραση του SNR στην παρατηρούμενη καθυστέρηση. Για καλύτερη ευκρίνεια περιλαμβάνονται μόνο οι γραμμές για τα σημεία με SNR=3, ενώ για τις περιπτώσεις με SNR=0 με SNR=10 δίνονται μόνο τα σημεία (με σκούρο και ανοιχτό χρώμα αντίστοιχα). Αν και με μία πρώτη ματιά δε φαίνεται να υπάρχει κάποια συνεπής επίδραση του SNR στις καθυστερήσεις, πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές καθυστέρησης μεγαλύτερες από 200-250 ms αντιστοιχούν σε συνθήκες λειτουργίας για τις οποίες δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί η εισερχόμενη κίνηση. Οι καθυστερήσεις σε αυτή την περίπτωση αυξάνονται χωρίς όριο. Έτσι, οι τιμές που παρατηρήθηκαν δεν είναι συγκρίσιμες μεταξύ προσομοιώσεων.

Μια δεύτερη παρατήρηση για τις τιμές που περιλαμβάνονται στο διάγραμμα, είναι ότι αυτές αντιστοιχούν σε μία περιοχή του χώρου λειτουργίας όπου γενικά κάθε μετάδοση (κάθε ξεχωριστή φυσική μετάδοση) είναι επιτυχής (πρβλ τα διαγράμματα μέσου πλήθους μετάδοσης για καθοδική και ανοδική κίνηση, SNRs=0, 3 και 10 και Icms=9). Επομένως, η αλλαγή του SNR σε αυτή την περίπτωση δίνει αμελητέες διαφορές, καθώς η επίδραση του SNR στα αποτελέσματα, λαμβάνει χώρα μέσω της εξάρτησης από αυτόν της πιθανότητας επιτυχούς λήψης σε κάθε μετάδοση. Επομένως, δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των προσομοιώσεων με διαφορετικούς SNRs αφού και στις τρεις περιπτώσεις η πιθανότητα επιτυχούς λήψης με την πρώτη μετάδοση είναι κοντά στο 1.

Ενώ το διάγραμμα στο Σχήμα 6.10 εξετάζει την επίδραση του TDD (και του SNR) κρατώντας όλες τις άλλες παραμέτρους σταθερές, το διάγραμμα του Σχήματος 6.11 αντιστοιχεί στην επίδραση του Icms. Και σε αυτή την περίπτωση οι συμβάσεις για τα χρώματα και τις γραμμές του διαγράμματος είναι αντίστοιχες με αυτές στο Σχήμα 6.10. Πρέπει να σημειωθεί ότι η προέκταση του διαγράμματος προς τα αριστερά (δηλαδή για τιμές του Icms μικρότερες από 7) οδηγεί σε πολύ μεγάλη αύξηση των καθυστερήσεων για την καθοδική κίνηση και έτσι αυτές έχουν παραλειφθεί από το διάγραμμα. Το ίδιο ισχύει και για τιμές του Icms μεγαλύτερες από 12, αλλά με μικρότερη αύξηση των καθυστερήσεων.



Σχήμα 6.11: Επίδραση του συντελεστή Icms στην καθυστέρηση.

Χαρακτηριστικό του διαγράμματος 6.11 είναι η απότομη αύξηση της καθυστέρησης για την καθοδική κίνηση για την τιμή Icms=10. Η μετάβαση στην τιμή 10 συνοδεύεται από αλλαγή της τάξης της διαμόρφωσης από 2 (QPSK) σε 4 (16-QAM). Η βέλτιστη τιμή για τη διαμόρφωση TDD σε αυτή την περίπτωση είναι η 1 η οποία περιλαμβάνει τέσσερα καθοδικά υποπλάισια, τέσσερα ανοδικά υποπλάισια και 2 υποπλάισια φρούρησης.

6.2 Εύρεση βέλτιστου σημείου λειτουργίας

Πέρα από την προσομοίωση των βασικών χαρακτηριστικών της επικοινωνίας μεταξύ χρηστών και eNodeB, στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εύρεση μίας διαδικασίας επιλογής των βέλτιστων παραμέτρων λειτουργίας ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη απόδοση του συστήματος. Καθώς στον ορισμό του προβλήματος η ρυθμιστική παράμετρος της κίνησης εισόδου είναι καθορισμένη, ως παράμετρος προς βελτιστοποίηση ορίστηκε η παρατηρούμενη καθυστέρηση. Σημαντική επίσης παράμετρος με άμεση πρακτική σημασία είναι και ο λόγος απόρριψης. Ωστόσο, για τις τιμές των παραμέτρων που μελετήθηκε βρέθηκε γενικά ότι χαμηλές τιμές καθυστερήσεων σημειώνονται μόνο σε συνθήκες λειτουργίας που ο λόγος απόρριψης είναι μικρός. Επομένως, η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης αρκεί, καθώς κατά τη βελτιστοποίηση αυτής ελαχιστοποιείται ταυτόχρονα και ο λόγος απόρριψης.

Η επιλογή του βέλτιστου ζεύγους του δείκτη TDD και του Icms συνίσταται στην επίλογη ενός από τους διαθέσιμους $29 \times 7 = 203$ διαφορετικούς συνδυασμούς. Παρόλο που ο χώρος αναζήτησης είναι σχετικά μικρός, το πρόβλημα περιπλέκεται εξαιτίας των ακόλουθων παρατηρήσεων:

- Απαιτείται μία διαδικασία γενική, σταθερή, με λίγες ρυθμιζόμενες παραμέτρους ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές συνθήκες και προβλήματα.
- Παρόλο που υπάρχει μία κανονικότητα στις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, υπάρχουν επίσης ασυνέχειες και μη μονότονες εξαρτήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν.
- Η διαδικασία θα πρέπει να εφαρμόζεται δυναμικά και να μπορεί να προσαρμόζεται σε συστήματα που εξελίσσονται με το χρόνο.

- Πρέπει να αντιμετωπούν οι βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις που μπορεί να είναι εγγενείς στο σύστημα.
- Ο χρόνος εξερεύνησης κατά τον οποίο δοκιμάζονται πιθανές νέες καταστάσεις θα πρέπει να μπορεί να προσαρμόζεται στις ανάγκες του συστήματος, ώστε η αποδοσή του να μην επηρεάζεται από την λειτουργία σε μη βέλτιστες καταστάσεις για μεγάλα διαστήματα.

Αρχικά μελετήθηκε η περίπτωση της κίνησης με δεδομένα χαρακτηριστικά που δε μεταβάλλονται μεσοπρόθεσμα με το χρόνο (παρόλο που οι χρόνοι μεταξύ των αφίξεων των πακέτων είναι τυχαία μεγέθη και οδηγούν σε βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις). Μετά την προσομοίωση για 10,000 ms ελήφθησαν τα συνολικά, μέσα χαρακτηριστικά και χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας. Παρόλο που πρακτικά δεν είναι πάντα δυνατή η χρήση τόσο όγκου δεδομένων για την επιλογή της βέλτιστης κατάστασης, εντούτοις τα δεδομένα αυτά αποτελούν ένα χρήσιμο μέσο για την κατάστρωση ενός πρακτικού αλγορίθμου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένα benchmark έναντι του οποίου μπορεί να αξιολογηθεί η απόδοση άλλων πιο ρεαλιστικών πρακτικών.

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε μπορεί να περιγραφεί με βάση τα βήματα που περιγράφονται παρακάτω:

Αποφυγή καταστάσεων με υψηλό λόγο απόρριψης

Η βασική λειτουργία αυτού του βήματος είναι η αποφυγή των καταστάσεων κατά τις οποίες ο λόγος απόρριψης είναι 1, δηλαδή στις περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν υπάρχει κανένα πακέτο που ελήφθη επιτυχώς. Στην περίπτωση αυτή δεν μπορεί να οριστεί η μέση καθυστέρηση και επομένως πρέπει να χρησιμοποιηθεί μία άλλη μετρική για τον καθορισμό ενός καλύτερου σημείου λειτουργίας. Οι υψηλοί λόγοι απόρριψης παρατηρούνται για υψηλές τιμές του I_{cms} και επομένως το πρόβλημα αντιμετωπίζεται στον αλγόριθμο με τη μείωση του I_{cms} , όποτε εμφανίζεται μία τέτοια κατάσταση. Εναλλακτικά θα μπορούσε η επιλογή του αρχικού σημείου λειτουργίας να

μην είναι τυχαία, αλλά στην παρούσα εργασία έγινε η υπόθεση της πλήρους άγνοιας για το σύστημα στην αρχική του κατάσταση.

Εξερεύνηση του χώρου καταστάσεων

Στο βήμα αυτό προσδιορίζεται η καθυστέρηση για ένα διαφορετικό σημείο λειτουργίας. Το σημείο αυτό επιλέγεται τυχαία. Στην πρώτη έκδοση του αλγορίθμου, πιθανά σημεία εξερεύνησης ήταν τα τεσσερα γειτονικά σημεία του τρέχοντος σημείου λειτουργίας. Η πιθανότητα επιλογής ήταν η ίδια σε όλες τις περιπτώσεις. Βρέθηκε, ωστόσο, ότι ο αλγόριθμος λειτουργούσε καλύτερα όταν ήταν επιτρεπτές μετατοπίσεις σε σημεία πέρα από τα τέσσερα γειτονικά. Συγκεκριμένα, στην τελική έκδοση που χρησιμοποιήθηκε, αρχικά επιλέγεται μία από τις 4 κατευθύνσεις στο χώρο για το σημείο που εξετάζεται. Στη συνέχεια επιλέγεται το άμεσο γειτονικό σημείο κατά την επιλεγμένη κατεύθυνση με πιθανότητα 2/3, ή το σημείο που απέχει απόσταση 2 κατά την επιλεγμένη κατεύθυνση με πιθανότητα 1/3. Αυτή η πρακτική απέδωσε καλύτερα από την επιλογή ενός από τα 8 γειτονικά σημεία (τους 4 άμεσους γείτονες και τα 4 διαγώνια σημεία) και υιοθετήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις.

Επιλογή ή απόρριψη της νέας κατάστασης

Σε αυτό το στάδιο λαμβάνεται η απόφαση για το αν το σημείο που εξετάστηκε θα αποτελέσει νέο σημείο λειτουργίας ή όχι. Η απόφαση αυτή είναι τυχαία και εξαρτάται από τη βελτίωση που επιφέρει η νέα κατάσταση στην παρατηρούμενη καθυστέρηση. Συγκεκριμένα υπολογίζεται ο λόγος παλιάς/νέας τιμής και με βάση αυτή υπολογίζεται η πιθανότητα αποδοχής όπως περιγράφεται παρακάτω. Η επιλογή του νέου σημείου ως νέο σημείο λειτουργίας γίνεται με πιθανότητα ίση με την πιθανότητα υποδοχής.

Ως συνάρτηση για τον προσδιορισμό της πιθανότητας αποδοχής επιλέχθηκε η λογιστική συνάρτηση:

$$P(x) = \frac{L}{1 + e^{-k(x-x_0)}} \quad (3)$$

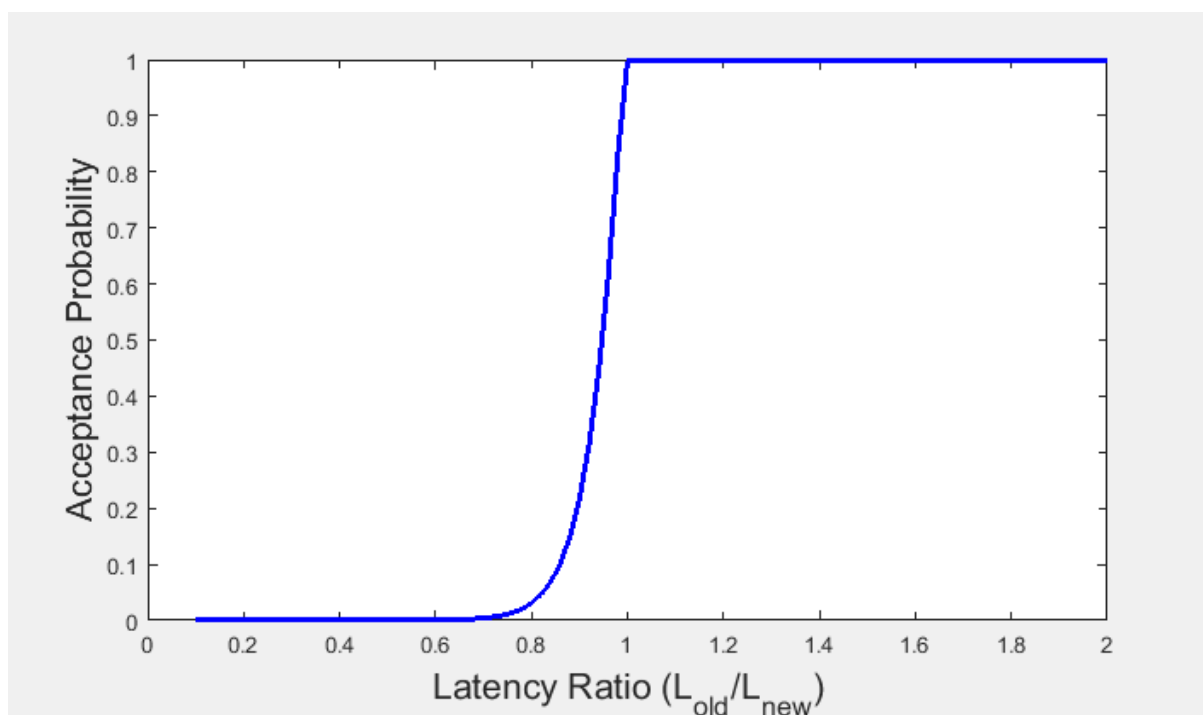
Στην περίπτωση που $L=1$, η συνάρτηση αυτή είναι 0 για χαμηλές τιμές του ορίσματός της, 1 για υψηλές και παρέχει μία ομαλή μετάβαση από το 0 στο 1 για ενδιάμεσες τιμές. Κατά την υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε ως όρισμα της συνάρτησης ο λόγος της καθυστέρησης στο τρέχον σημείο λειτουργίας προς την καθυστέρηση στο νέο σημείο λειτουργίας. Η τιμή που προκύπτει με βάση αυτό το όρισμα χρησιμοποιήθηκε ως πιθανότητα αποδοχής του νέου σημείου λειτουργίας.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της λογιστικής συνάρτησης είναι ότι περιέχει μόνο τρεις ελεύθερες παραμέτρους που πρέπει να προσδιοριστούν. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν τυχαία διαφορετικοί συνδυασμοί (L, k, x_0) και επιχειρήθηκε η εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας για ανοδική, καθοδική και σταθμισμένη κίνηση και για $SNR=-3, 0, 3, 10$. Η επιλογή των βέλτιστων τιμών για τις παραμέτρους έγινε με βάση το ποσοστό μη σύγκλισης, την επιβάρυνση λειτουργίας και την επιβάρυνση εξερεύνησης και οι βέλτιστες τιμές για τις παραμέτρους δίνονται στον Πίνακα 6.1. Γενικά πάντως, προέκυψαν αρκετοί συνδυασμοί που δίνουν παρόμοια αποτελέσματα με αυτά των τιμών που επιλέχθηκαν, γεγονός που υποδηλώνει ότι η επιλογή των παραμέτρων δεν είναι κρίσιμη για την επιτυχή λειτουργία του αλγορίθμου αναζήτησης.

Στο Σχήμα 6.12 απεικονίζεται η πιθανότητα αποδοχής του νέου σημείου βασισμένη στη λογιστική συνάρτηση με τις τιμές που επιλέχθηκαν για τις παραμέτρους. Παρόλο που σύμφωνα με τον τύπο (3) η συνάρτηση μπορεί να πάρει τιμές μεγαλύτερες από 1 (όταν το $L>1$), η διαδικασία αποδοχής του νέου σημείου λειτουργίας είναι τέτοια που να δίνει πιθανότητα αποδοχής ακριβώς ένα αν αυτό συμβεί. (Ο αλγόριθμος προβλέπει την ομοιομορφη, τυχαία επιλογή ενός αριθμού στο διάστημα $(0,1)$ και τη σύγκριση με την τιμή της συνάρτησης. Επομένως για όλα τα ορίσματα για τα οποία η συνάρτηση είναι μεγαλύτερη του 1, η πιθανότητα αποδοχής είναι 1, καθώς ο αριθμός που επιλεχθηκε δεν μπορεί παρά να είναι μικρότερος της συνάρτησης).

Παρόλο που η επιλογή των παραμέτρων έγινε τυχαία, η μορφή της συνάρτησης που προέκυψε είναι άμεσα ερμηνεύσιμη. Συγκεκριμένα, για όλες τις τιμές για τις οποίες ο

λόγος καθυστέρησης είναι μεγαλύτερος από 1, δηλαδή για τις περιπτώσεις όπου η νέα κατάσταση δίνει μικρότερες καθυστερήσεις, η νέα κατάσταση επιλέγεται με πιθανότητα 1. Στην αντίθετη περίπτωση, ωστόσο, κατά την οποία η νέα κατάσταση εμφανίζει μεγαλύτερες καθυστερήσεις από την τρέχουσα, η νέα κατάσταση δεν απορρίπτεται σε κάθε περίπτωση, αλλά γενικά υπάρχει μία μη μεδενική πιθανότητα αποδοχής. Παρόλο που αυτή η πρακτική βραχυπρόθεσμα οδηγεί σε επιβαρύνσεις κατά τη λειτουργία, ωστόσο επιτρέπει την διαφυγή από τοπικά ελάχιστα και έτσι είναι ωφέλιμη μακροπρόθεσμα. Η πιθανότητα αυτή μειώνεται απότομα όσο ο λόγος καθυστέρησης αποκλίνει από την τιμή 1 και γίνεται πολύ μικρή για τιμές αυτού του λόγου μικρότερες από 0.8.



Σχήμα 6.12: Συνάρτηση πιθανότητας αποδοχής νέου σημείου λειτουργίας.

Οι τιμές του πίνακα 6.1 χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου αναζήτησης βέλτιστης λειτουργίας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους Πίνακες 6.2-

6.5. Σε αυτούς εξετάζονται οι μετρικές για τη σύγκλιση για 4 διαφορετικούς λόγους SNR και για ανοδική, καθοδική και σταθμισμένη κίνηση. Η πρώτη από τις τέσσερις τιμές σε κάθε εγγραφή του πίνακα (με τον τίτλο sim) αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται τα μέσα αποτελέσματα από την πλήρη προσομοίωση του συστήματος για 10,000 ms όπως περιγράφηκε παραπάνω.

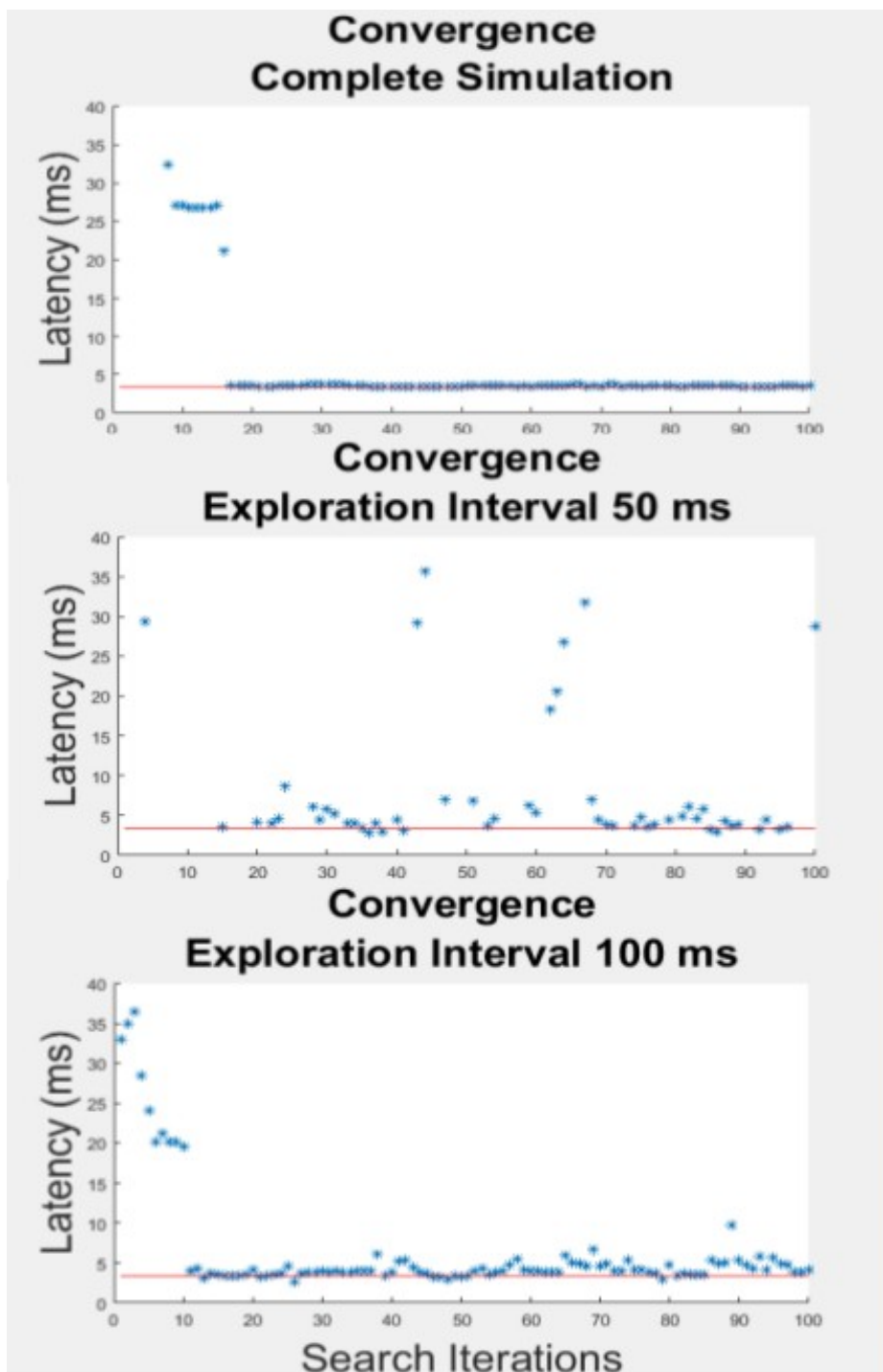
Στον Πίνακα 6.2 φαίνεται το ποσοστό των εφαρμογών του αλγορίθμου που ολοκληρώθηκε με τη σύγκλιση στο βέλτιστο σημείο. Εκτελέστηκαν 1000 διαφορετικές επαναλήψεις του αλγορίθμου ξεκινώντας από τυχαίο σημείο με μέγιστο αριθμό βημάτων τα 500. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις η σύγκλιση ήταν πλήρης. Παράλληλα εξετάστηκε και ο απαιτούμενος αριθμός των επαναλήψεων για τη σύγκλιση. Ο μέσος αριθμός βημάτων ήταν μικρότερος από 100 (με εξαίρεση μία περίπτωση όπου ήταν 102.1) (Πίνακας 6.3). Στο πάνω τμήμα του Σχήματος 6.13, φαίνεται μία τυπική περίπτωση της εκτέλεσης του αλγορίθμου για 100 βήματα. Η κόκκινη γραμμή αποτελεί το στόχο του αλγορίθμου, δηλαδή την ελάχιστη τιμή της καθυστέρησης.

Πίνακας 6.1: Βέλτιστες τιμές για τις παραμέτρους της συνάρτησης αποδοχής.

Παράμετρος	Τιμή
L	2.746
k	20.21
χ_0	1.021

Μία ιδιαίτερα σημαντική μετρική είναι και η επιβάρυνση που προκύπτει από την άγνοια της βέλτιστης τιμής και από την ανάγκη εξερεύνησης του χώρου των επιτρεπτών καταστάσεων. Στον Πίνακα 6.4 υπολογίζεται ένας συντελεστής επιβάρυνσης που ποσοτικοποιεί την απόκλιση των παρατηρούμενων καθυστερήσεων σε σχέση με την ελάχιστη καθυστέρηση. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος εκτελείται για 1000 επαναλήψεις ξεκινώντας από το σημείο όπου παρατηρείται το βέλτιστο και υπολογίζεται ο λόγος της μέσης καθυστέρησης κατά την

εξέλιξη της εκτέλεσης προς την ελάχιστη μέση καθυστέρηση. Οι τιμές που παρατηρούνται προσεγγίζουν τη βέλτιστη δυνατή τιμή που είναι 1 (η μεγαλύτερη απόκλιση που παρατηρείται είναι 1.072).



Σχήμα 6.13: Καθυστερήσεις κατά την εκτέλεση του αλγόριθμου αναζήτησης.

Ωστόσο, η μετρική αυτή δεν εμπεριέχει την πλήρη εικόνα για τη λειτουργία του συστήματος. Οι τιμές στις οποίες στηρίζεται είναι οι τιμές λειτουργίας που επιλέγονται από τον αλγόριθμο. Για να επιλεγεί (ή να απορριφθεί) μία κατάσταση όμως, είναι απαραίτητο να δοκιμαστεί ώστε να συγκριθεί με την τρέχουσα κατάσταση. Επομένως, στη λειτουργία του συστήματος εμπεριέχεται ένα κόστος εξερεύνησης, που έχει να κάνει με την περιοδική λειτουργία του συστήματος σε νέες καταστάσεις ώστε να αποκτηθεί μία πληρέστερη εικόνα για την τρέχουσα εικόνα του συστήματος.

Με τον ίδιο τρόπο που ορίστηκε ο συντελεστής επιβάρυνσης λειτουργίας, υπολογίστηκε και ο συντελεστής επιβάρυνσης εξερεύνησης. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε ο μέσος όρος των καθυστερήσεων που αντιστοιχούν στις υποψήφιας νέες καταστάσεις (ανεξάρτητα αν αυτές επιλέγονται τελικά ή όχι). Οι τιμές του συντελεστή αυτού είναι αρκετά μεγαλύτερες και κυμαίνονται μεταξύ 1.4 και 7.4. Αυτό δεν είναι περίεργο αν αναλογιστούμε ότι η επιλογή των νέων καταστάσεων γίνεται τυχαία και επομένως σε πολλές περιπτώσεις το σύστημα λειτουργεί μακριά από τη βέλτιστη τιμή. Σε ένα σύστημα που παρουσιάζει δυναμική συμπεριφορά όμως, το κόστος εξερεύνησης είναι αναπόφευκτο καθώς θα πρέπει περιοδικά να δοκιμάζονται νέες περιοχές στο χώρο καταστάσεων.

Η βαρύτητα του συντελεστή εξερεύνησης, ωστόσο, δεν είναι ίδια με αυτή του συντελεστή λειτουργίας. Ο χρόνος εξερεύνησης μπορεί να είναι σημαντικά μικρότερος του χρόνου λειτουργίας. Για παράδειγμα αν θεωρήσουμε ότι εξετάζουμε μία υποψήφια νέα κατάσταση για 1 χρονική μονάδα, αλλά η λειτουργία στην κατάσταση που αποδεχόμαστε (νέα ή παλιά) διαρκεί 10 χρονικές μονάδες, η επιβάρυνση που παρατηρείται συνολικά είναι σημαντικά μικρότερη. Για παράδειγμα για την περίπτωση του SNR=0 και της καθοδικής κίνησης, η μέση συνολικά επιβάρυνση είναι:

$$(10 \times 1.046 + 1 \times 3.492) / 11 = 1.268$$

Πίνακας 6.2: Ποσοστό σύγκλισης για τυχαία κίνηση.

	Καθοδική Κίνηση				Ανοδική Κίνηση				Σταθμισμένη Κίνηση			
	sim	50 ms	100 ms	250 ms	sim	50 ms	100 ms	250 ms	sim	50 ms	100 ms	250 ms
SNR=-3	99.9%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	-	-	-	-
SNR=0	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	99.9%	100.0%	100.0%	100.0%	99.7%	99.9%	97.2%
SNR=3	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
SNR=10	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	98.3%	100.0%	100.0%	100.0%	99.4%	100.0%	100.0%

Πίνακας 6.3: Μέσο πλήθος επαναλήψεων ως τη σύγκλιση για τυχαία κίνηση.

	Καθοδική Κίνηση				Ανοδική Κίνηση				Σταθμισμένη Κίνηση			
	sim	50 ms	100 ms	250 ms	sim	50 ms	100 ms	250 ms	sim	50 ms	100 ms	250 ms
SNR=-3	102.1	71.9	39.5	34.0	64.4	76.7	33.5	32.9	-	-	-	-
SNR=0	25.0	110.2	32.8	26.6	43.0	170.0	39.2	36.3	83.8	208.0	140.3	188.4
SNR=3	27.3	111.5	45.0	36.0	33.7	104.3	28.8	26.7	68.0	145.1	40.14	33.6
SNR=10	30.1	135.3	43.3	34.9	52.6	253.1	70.1	62.3	77.3	205.0	66.2	60.6

Πίνακας 6.4: Επιβάρυνση λειτουργίας για τυχαία κίνηση.

	Καθοδική Κίνηση				Ανοδική Κίνηση				Σταθμισμένη Κίνηση			
	sim	50 ms	100 ms	250 ms	sim	50 ms	100 ms	250 ms	sim	50 ms	100 ms	250 ms
SNR=-3	1.001	15.853	1.226	1.561	1.014	11.054	1.079	1.150	-	-	-	-
SNR=0	1.046	37.283	1.228	1.105	1.051	19.890	1.089	1.105	1.016	8.065	1.140	1.127
SNR=3	1.060	29.083	2.471	1.175	1.045	29.454	1.373	1.061	1.018	3.456	1.030	1.074
SNR=10	1.072	39.002	1.335	1.141	1.089	7.984	1.212	1.127	1.017	5.911	1.128	1.118

Πίνακας 6.5: Επιβάρυνση εξερεύνησης για τυχαία κίνηση.

	Καθοδική Κίνηση				Ανοδική Κίνηση				Σταθμισμένη Κίνηση			
	sim	50 ms	100 ms	250 ms	sim	50 ms	100 ms	250 ms	sim	50 ms	100 ms	250 ms
SNR=-3	2.972	16.639	9.907	9.668	5.322	11.331	11.730	10.907	-	-	-	-
SNR=0	3.492	41.856	2.894	2.611	3.148	19.099	2.716	2.258	4.993	7.432	6.781	5.973
SNR=3	7.431	31.494	15.029	12.113	1.458	26.235	5.240	1.613	2.994	3.649	5.294	5.584
SNR=10	1.412	40.960	4.258	1.670	3.007	8.126	3.710	2.169	3.037	5.698	3.346	2.949

Ο λόγος χρόνων λειτουργίας προς εξερεύνησης μπορεί να επιλεγεί να είναι ακόμη υψηλότερος από το παραπάνω παράδειγμα αν δεν υπάρχουν θέματα βραχυπρόθεσμων τυχαίων διακυμάνσεων ή μεσοπρόθεσμων μεταβολών στα χαρακτηριστικά του συστήματος. Τα θέμα των διακυμάνσεων έχει μεγάλη σημασία σε όσα εξετάζονται παρακάτω.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω αποτελούν μία εξιδανίκευση καθώς στηρίζονται στις συνολικές μέσες καθυστερήσεις που παρατηρούνται για όλο το διάστημα της προσομοίωσης. Στην πράξη όμως αυτό που είναι διαθέσιμο είναι η καθυστέρηση για ένα συγκεκριμένο (και σχετικά μικρό) χρονικό διάστημα. Για το σκοπό αυτό κατά την προσομοίωση για τις συνολικές μέσες μετρικές, συγκεντρώθηκαν και τιμές των αντίστοιχων μεγεθών σε μικρά χρονικά διαστήματα των 50 ms. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος αλγόριθμος για την εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας, χρησιμοποιώντας όμως το σύνολο των τιμών για καθένα από τα διαστήματα των 50 ms για κάθε σημείο λειτουργίας και όχι τη μέση τιμή συνολικά. Η επιλογή του νέου υποψήφιου σημείου λειτουργίας έγινε με τον ίδιο τυχαίο τρόπο όπως και πριν, αλλά η τιμή της καθυστέρησης που χρησιμοποιήθηκε αναφερόταν στο επόμενο διάστημα των 50 ms. Σε κάθε βήμα ανανεωνόταν ο δείκτης που αναφερόταν σε κάθε διάστημα ώστε να ακολουθεί την πάροδο του χρόνου.

Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν βάσει των τιμών σε καθένα από τα διαστήματα των 50 ms ήταν πολύ χειρότερα από αυτά που ελήφθησαν βάσει των μέσων τιμών (Οι τιμές αυτές είναι στη δεύτερη θέση σε κάθε εγγραφή των πινάκων 6.3-6.5). Αν και επιδείνωση παρατηρήθηκε για όλες τις μετρικές, οι χειρότερες τιμές ήταν αυτές για τις επιβαρύνσεις και ιδιαίτερα για τις επιβαρύνσεις λειτουργίας.

Αυτό είναι εμφανές και κατά την επισκόπηση μιας τυπικής εκτέλεσης του αλγορίθμου στο μεσαίο διάγραμμα του σχήματος 6.13, όπου χρησιμοποιούνται στατιστικά που συγκεντρώνονται σε διαστήματα των 50 ms. Δε φαίνεται να υπάρχει μία συγκεκριμένη συμπεριφορά κατά την εξέλιξη της αναζήτησης του βελτίστου. Αντίθετα, οι καθυστερήσεις που μετρώνται είναι σχεδόν τυχαίες, χωρίς να

ακολουθούν κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο. Υπάρχουν σημεία λειτουργίας όπου η καθυστέρηση είναι μικρότερη από τη βέλτιστη (αυτό είναι δυνατό καθώς η τιμή καθυστέρησης σε κάποιο διάστημα 50 ms μπορεί λόγω διακυμάνσεων να είναι μικρότερη από τη μέση) αλλά και σημεία όπου η καθυστέρηση είναι σημαντικά μεγαλύτερη.

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι το διάστημα των 50 ms που επιλέχθηκε είναι τόσο μικρό ώστε τα μεγέθη που υπολογίζονται να εμφανίζουν σημαντικές διακυμάνσεις. Έτσι η τιμή της καθυστέρησης σε ένα χρονικό διάστημα, δεν αποτελεί αξιόπιστο μέτρο της καθυστέρησης για το επόμενο διάστημα και πολύ λιγότερο για τη μέση καθυστέρηση του συστήματος συνολικά. Κατά συνέπεια, η επιλογή της επόμενης κατάστασης είναι οριακά μόλις καλύτερη από την τυχαία επιλογή. Είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου με αυτές τις παραμέτρους, οι επιβαρύνσεις λειτουργίας είναι εφάμιλλες των επιβαρύνσεων εξερεύνησης αφού και στις δύο περιπτώσεις η επιλογή της επόμενης κατάστασης είναι (περίπου) τυχαία.

Με δεδομένο το πρόβλημα που προκύπτει από τις διακυμάνσεις λόγω του μικρού χρονικού διαστήματος εξερεύνησης, η αύξηση αυτού αναμένεται να εξομαλύνει τις διακυμάνσεις και να οδηγήσει σε καλύτερα αποτελέσματα. Αυτό είναι πράγματι το αποτέλεσμα της χρήσης 100 ms και 250 ms ως το διάστημα υπολογισμού των μετρικών αντί για 50 ms (Πίνακες 6.2-6.5). Οι τιμές είναι πολύ καλύτερες από την περίπτωση των 50 ms, υπολείπονται όμως των τιμών που προκύπτουν από τη γνώση των συνολικών στατιστικών. Ένα τυπικό διάγραμμα για την περίπτωση των 100 ms, φαίνεται στο κάτω μέρος του σχήματος 6.13. Το διάγραμμα αυτό είναι μία ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ της περίπτωσης της χρήσης όλων των δεδομένων και της λήψης στατιστικών σε διαστήματα των 50 ms. Γενικά η αύξηση του διαστήματος εξερεύνησης σε μεγαλύτερες τιμές δίνει ακόμη καλύτερα αποτελέσματα, αλλά η παρατηρούμενη βελτίωση παρουσιάζει μικρότερο ρυθμό όσο αυξάνεται η διάρκεια του.

6.3 Εφαρμογή σε δεδομένα πραγματικής κίνησης

Στα προηγούμενα κεφάλαια περιγράφεται η προσομοίωση της επικοινωνίας μεταξύ χρηστών και eNodeB, χρησιμοποιώντας κίνηση που παράγεται τυχαία. Εδώ αναλύεται η περίπτωση χρήσης δεδομένων πραγματικής επικοινωνίας. Δύο περιπτώσεις εξετάζονται: Κίνηση VoIP και κίνηση RealMedia. Και στις δύο περιπτώσεις εξετάζονται ταυτόχρονα το καθοδικό και το ανοδικό κομμάτι της επικοινωνίας.

Στον Πίνακα 6.6 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των δύο ροών. Δύο είναι οι βασικές διαφορές. Από τη μία μεριά η κίνηση VoIP αντιστοιχεί σε μία σχετικά ισορροπημένη επικοινωνία σε σχέση με το ανοδικό και το καθοδικό μέρος της. Αντίθετα η κίνηση RealMedia, είναι μία κίνηση έντονα ασύμμετρη, καθώς τα καθοδικά δεδομένα που μεταδίδονται σε αυτή είναι σχεδόν τριάντα φορές περισσότερα από τα ανοδικά.

Πίνακας 6.6: Σύγκριση χαρακτηριστικών ροής VoIP και ροής RealMedia.

	VoIP		RealMedia	
	Ανοδική	Καθοδική	Ανοδική	Καθοδική
Συνολικός Χρόνος (ms)	11,200		10,000	
Συνολικά Δεδομένα (kbytes)	157.3	99.6	7.8	220.4
Μέσο μέγεθος πακέτου (bytes)	230.1	147.0	65.2	1320.0
Συνηθέστερο μέγεθος πακέτου (bytes)	232	153	54	1514
Μέσο διάστημα μεταξύ αφίξεων (ms)	16.0	16.2	82.9	58.5
Μέσος Ρυθμός Δεδομένων (kbps)	115.0	72.9	6.4	180.0

Μία δεύτερη σημαντική διαφορά, που προκύπτει από το μέσο χρόνο μεταξύ των αφίξεων των δεδομένων, είναι το γεγονός ότι στην κίνηση VoIP τα πακέτα δεδομένων

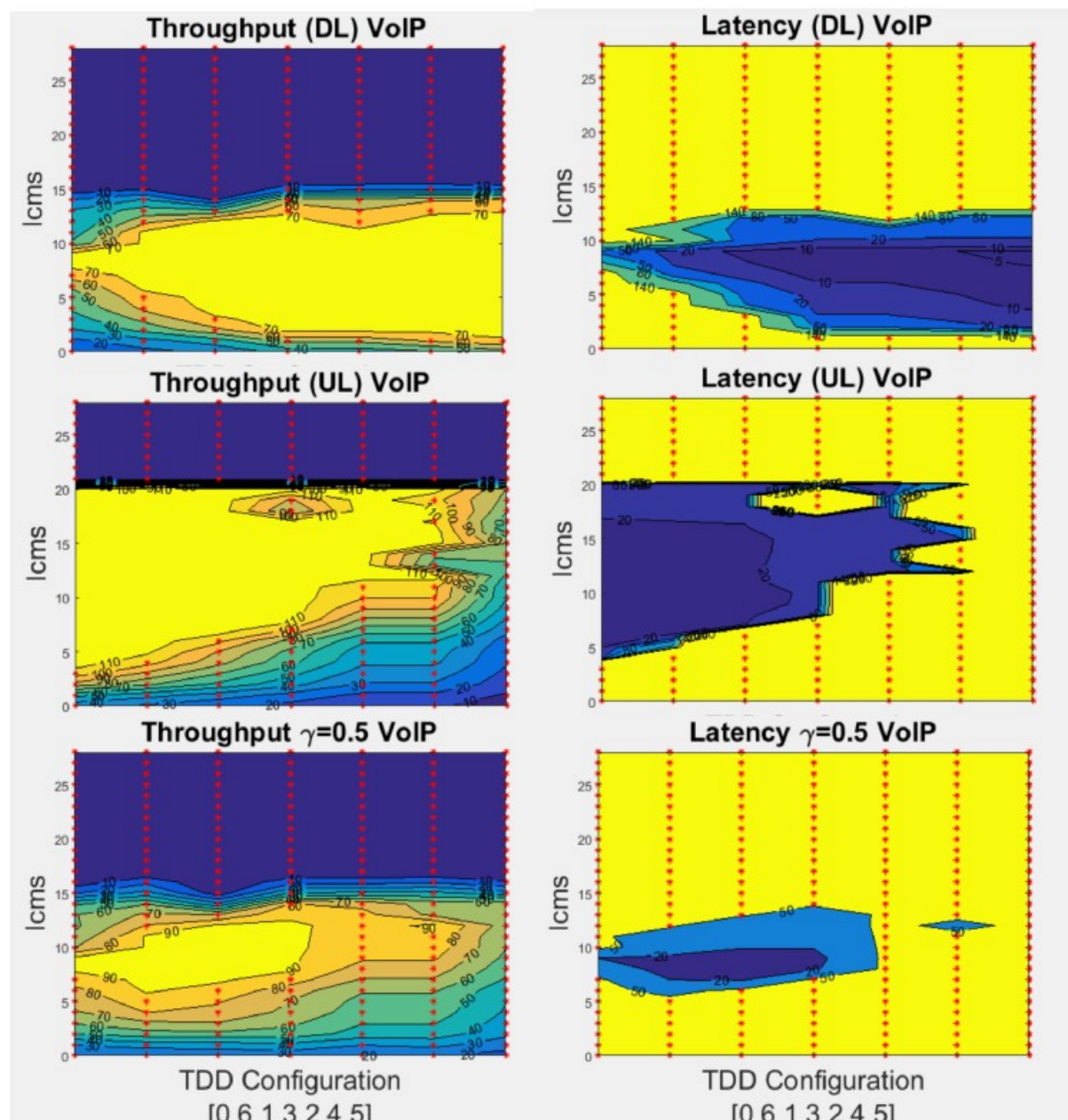
καταφθάνουν με ταχύτερο ρυθμό από ότι στην κίνηση RealMedia. Στην περίπτωση της ανοδικής κίνησης ο λόγος των ρυθμών αφίξεων είναι μεγαλύτερος του 5. Αυτό έχει πολύ σημαντική επίδραση στην εύρεση της βέλτιστης κατάστασης λειτουργίας, καθώς μεγάλοι χρόνοι μεταξύ των αφίξεων συνεπάγονται σημαντικές διακυμάνσεις στις τιμές των στατιστικών που συλλέγονται καθιστώντας την επιλογή της βέλτιστης κατάστασης πιο σύνθετη.

Στα Σχήματα 6.14 και 6.15 δίνονται τα αποτελέσματα για τη ρυθμαπόδοση και την καθυστέρηση στην περίπτωση της κίνησης VoIP και της κίνησης RealMedia. Στην περίπτωση του VoIP, η περιοχή που περιέχει τα επιτρεπτά σημεία λειτουργίας τόσο για την καθοδική όσο και την ανοδική κίνηση είναι ευρύτερη από τις αντίστοιχες περιοχές που εξετάστηκαν παραπάνω (πρβλ. τα σχήματα 6.1-6.2 και 6.5-6.6 για την περίπτωση του SNR=3). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο μέσος ρυθμός άφιξης δεδομένων είναι μικρότερος στην περίπτωση του VoIP (περίπου 73 kbps για καθοδική και 115 kbps για ανοδική κίνηση έναντι 125 kbps και για τις δύο περιπτώσεις παραπάνω). Το κάτω μέρος του Σχήμα 6.14 περιλαμβάνει τη σταθμισμένη ρυθμαπόδοση και τη σταθμισμένη καθυστέρηση για $\gamma=0.5$.

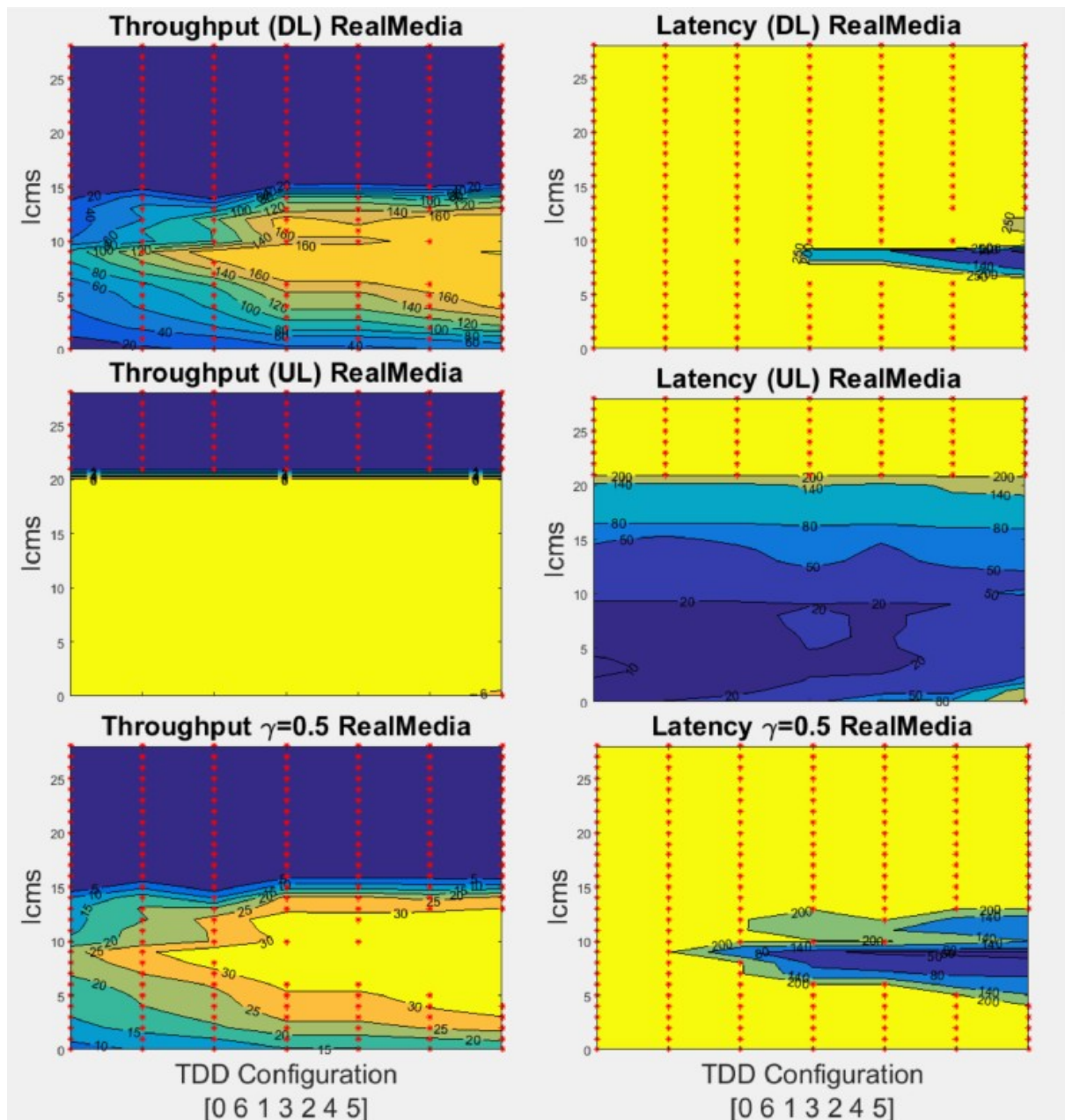
Στην περίπτωση της κίνησης RealMedia χαρακτηριστικό είναι το διάγραμμα της ανοδικής κίνησης, από το οποίο προκύπτει ότι υπάρχει ένα πολύ μεγάλο εύρος από δυνατές τιμές λειτουργίας που μπορούν να εξυπηρετήσουν την κίνηση. Αυτό δεν είναι περίεργο με δεδομένο τον πολύ μικρό ρυθμό μετάδοσης που απαιτείται. Τα σημεία λειτουργίας με Icms μεγαλύτερο του 20, αντιστοιχούν σε σημεία όπου ο λόγος απόρριψης των πακέτων είναι 1 (όπως προκύπτει από αποτελέσματα που δεν περιλαμβάνονται εδώ). Όπως περιγράφηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο λόγος απόρριψης εξαρτάται κυρίως από τον λόγο SNR και τον Icms και σε μικρό βαθμό μόνο από το δείκτη TDD.

Σε ότι αφορά τις απόλυτες τιμές των καθυστερήσεων, στην περίπτωση του VoIP αυτές είναι καλύτερες (μικρότερες) από αυτές στην περίπτωση του RealMedia. Σημαντική παράμετρος για αυτή την παρατήρηση είναι ο μέσος χρόνος αφίξεων των

πακέτων δεδομένων. Καθώς στην περίπτωση του RealMedia, σημειώνονται λιγότερες αφίξεις με περισσότερα δεδομένα, ο στιγμιαίος ρυθμός που πρέπει να εξυπηρετηθεί είναι μεγαλύτερος. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερες στιγμιαίες ποσότητες δεδομένων στα buffer εισόδου και μεγαλύτερες καθυστερήσεις.



Σχήμα 6.14: Ρυθμαπόδοση και καθυστέρηση για κίνηση VoIP.



Σχήμα 6.15: Ρυθμαπόδοση και καθυστέρηση για κίνηση RealMedia.

Η ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας παραπάνω, εφαρμόστηκε και για την περίπτωση των δεδομένων από πραγματικές ροές. Στον Πίνακα 6.7 παρουσιάζονται τα δεδομένα για την κίνηση VoIP, ενώ στον Πίνακα 6.8 για την κίνηση RealTime.

Πίνακας 6.7: Αποτελέσματα εκτέλεσης αλγορίθμου βελτιστοποίησης για VoIP.

	Ποσοστό Σύγκλισης			Μέσες Επαναλήψεις			Επιβάρυνση Λειτουργίας			Επιβάρυνση Εξερεύνησης		
	DL	UL	$\gamma=0.5$	DL	UL	$\gamma=0.5$	DL	UL	$\gamma=0.5$	DL	UL	$\gamma=0.5$
sim	100.0%	100.0%	99.9%	21.2	43.4	61.7	1.064	1.066	1.054	2.182	1.213	1.912
50 ms	93.4%	89.4%	92.1%	150.8	176.0	165.2	22.720	54.886	4.878	20.585	55.404	4.333
100 ms	100.0%	100.0%	99.9%	54.7	50.6	70.6	5.183	1.243	1.382	7.193	1.816	2.990
250 ms	100.0%	100.0%	100.0%	31.4	45.7	71.0	1.181	1.125	1.093	1.887	1.932	2.349

Πίνακας 6.8: Αποτελέσματα εκτέλεσης αλγορίθμου βελτιστοποίησης για RealMedia.

	Ποσοστό Σύγκλισης			Μέσες Επαναλήψεις			Επιβάρυνση Λειτουργίας			Επιβάρυνση Εξερεύνησης		
	DL	UL	$\gamma=0.5$	DL	UL	$\gamma=0.5$	DL	UL	$\gamma=0.5$	DL	UL	$\gamma=0.5$
sim	100.0%	100.0%	100.0%	35.0	66.6	66.5	1.010	1.072	1.020	2.459	1.250	1.893
50 ms	100.0%	53.9%	67.5%	75.7	215.1	199.2	6.729	14.439	4.114	5.804	16.780	3.856
100 ms	100.0%	83.9%	93.4%	39.2	187.7	160.5	4.690	8.682	2.955	5.972	7.219	2.722
250 ms	100.0%	96.6%	97.8%	39.5	149.4	135.6	3.115	3.796	2.823	4.422	3.442	2.557

Η περίπτωση του VoIP δεν εμφανίζει σοβαρά προβλήματα. Όπως και στα προηγούμενα κεφάλαια, η χρήση για την επιλογή του βέλτιστου σημείου λειτουργίας των συνολικών δεδομένων δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα με πολύ χαμηλές επιβαρύνσεις, τόσο λειτουργίας όσο και εξερεύνησης. Αντίθετα, στηρίζοντας την επιλογή λειτουργίας σε στατιστικά που συλλέγονται σε διαστήματα 50 ms, λαμβάνονται πολύ κακά αποτελέσματα σε όλες τις μετρικές. Αυτό οφείλεται στις μεγάλες διακυμάνσεις που εμφανίζουν τα δεδομένα οι οποίες οδηγούν σε επιλογή νέων καταστάσεων που δεν οδηγούν σε βελτίωση ή την παραμονή σε μία κατάσταση που είναι μακροπρόθεσμα κακή για το σύστημα. Όσο το διάστημα συλλογής δεδομένων αυξάνεται, τόσο οι διακυμάνσεις εξομαλύνονται και η απόδοση του συστήματος προσεγγίζει τη βέλτιστη. Ήδη για διάστημα 250 ms τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά και (σε ότι αφορά την περίπτωση των επιβαρύνσεων

καθυστερήσεις) καλύτερα από την περίπτωση της τυχαίας κίνησης.

Ωστόσο, για την περίπτωση του RealMedia, η απόδοση του συστήματος εμφανίζει μεγαλύτερες αποκλίσεις από τη βέλτιστη περίπτωση. Αν και η επιλογή με βάση τις συνολικές μέσες τιμές των στατιστικών εμφανίζει και πάλι πολύ καλές μετρικές, η περίπτωση της συλλογής δεδομένων ανα 50 ms, είναι ιδιαίτερα κακή. Μάλιστα, σε αυτή την περίπτωση, η σύγκλιση στη βέλτιστη τιμή για την ανοδική κίνηση λαμβάνει χώρα μόλις στο 50% των περιπτώσεων, που αποτελεί το μικρότερο ποσοστό που έχει παρατηρηθεί σε όλες τις μετρήσεις που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Σε αυτό συντελεί το γεγονός ότι ο χώρος των καταστάσεων είναι μεγαλύτερος, κυρίως όμως οφείλεται στο θόρυβο των δεδομένων που οδηγούν στη σχεδόν τυχαία διάσχιση του χώρου αυτού.

Παρόλο που τα αποτελέσματα είναι καλύτερα για μεγαλύτερες τιμές του διαστήματος συλλογής στατιστικών, οι τιμές που παίρνουν δεν είναι ιδιαίτερα καλές. Το σημαντικότερο θέμα προκύπτει από τις μεγάλες τιμές των επιβαρύνσεων λειτουργίας που ξεπερνούν την τιμή 3 ακόμη και για 250 ms. Αυτό δε σημαίνει απαραίτητα ότι οι καθυστερήσεις είναι υπερβολικά μεγάλες καθώς για να εξαχθεί αυτό το συμπέρασμα πρέπει να μελετηθούν οι απόλυτες τιμές των καθυστερήσεων και η ποιότητα υπηρεσίας της εφαρμογής. Ακόμη και σε αυτή την περίπτωση όμως η λειτουργία του συστήματος σε μη βέλτιστες συνθήκες είναι ανεπιθύμητη.

Αυξάνοντας το διάστημα συλλογής δεδομένων τα αποτελέσματα εξομαλύνονται γεγονός που υποδηλώνει ότι η αιτία του συνίσταται βασικά στις στατιστικές διακυμάνσεις στις τιμές που παρατηρούνται. Στον Πίνακα 6.9 παρατίθενται οι τιμές για διαστήματα εξερεύνησης ίσα με 750-1000 ms. Κατά συνέπεια, το πρόβλημα είναι εγγενές με το ερώτημα που επιχειρήθηκε να απαντηθεί με αυτή την εργασία και όχι με τη λύση που προτείνεται. Κάθε μεθοδολογία η οποία στηρίζεται στην online συλλογή δεδομένων ώστε να καθορίσει τις επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας θα πρέπει να εξετάζει την επίδραση της αβεβαιότητας στις παρατηρούμενες τιμές λόγω τυχαίων γεγονότων.

Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα εκτέλεσης αλγορίθμου βελτιστοποίησης για κίνηση RealMedia για μεγαλύτερο χρόνο συλλογής δεδομένων καθυστέρησης.

	Ποσοστό Σύγκλισης			Μέσες Επαναλήψεις			Επιβάρυνση Λειτουργίας			Επιβάρυνση Εξερεύνησης		
	DL	UL	$\gamma=0.5$	DL	UL	$\gamma=0.5$	DL	UL	$\gamma=0.5$	DL	UL	$\gamma=0.5$
750 ms	100.0%	99.9%	97.4%	38.9	123.3	120.0	1.538	1.511	1.004	3.579	1.813	2.070
900 ms	100.0%	99.6%	97.4%	39.6	121.7	120.4	1.532	1.302	1.039	4.079	1.550	2.000
1000 ms	100.0%	99.7%	99.1%	40.6	114.2	119.2	1.470	1.470	1.049	3.940	1.800	1.823

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η περίπτωση της αμφίδρομης λειτουργίας διαίρεσης χρόνου (TDD) για το LTE έχει λάβει σημαντικά λιγότερη προσοχή ερευνητικά σε σχέση με την περίπτωση της αμφίδρομης λειτουργίας διαίρεσης συχνότητας (FDD). Ωστόσο, η λειτουργία TDD παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα που περιλαμβάνουν μικρότερα κόστη, περισσότερη ευελιξία και καλύτερες επιδόσεις. Ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας είναι η μετάβαση κατά τα τελευταία χρόνια από τη χρήση της κινητής τηλεφωνίας για φωνητικές συνομιλίες στη λειτουργία εφαρμογών διαφόρων χαρακτηριστικών και απαιτήσεων οι οποίες συχνά χαρακτηρίζονται από ασυμμετρία μεταξύ της καθοδικής και ανοδικής κίνησης.

Ένα από τα πρώτα θέματα που τίθενται κατά τη λειτουργία TDD είναι η ανάθεση χρονικών περιόδων στη μετάδοση είτε ανοδικών είτε καθοδικών δεδομένων. Το πρότυπο LTE προβλέπει τη χρήση επτά διαφορετικών προκαθορισμένων λειτουργιών TDD, καθεμία από τις οποίες ορίζεται με βάση έναν ακέραιο δείκτη μεταξύ 0-6. Οι λειτουργίες αυτές προβλέπουν διαφορετικό αριθμό από χρονικά διαστήματα (υποπλάισια) αφιερωμένα σε καθοδική κίνηση και διαστήματα αφιερωμένα σε ανοδική. Η λειτουργία 0 αποτελεί τη λειτουργία με τον ελάχιστο λόγο καθοδικών/ανοδικών υποπλαισίων (2 καθοδικά έναντι 6 ανοδικών), ενώ η λειτουργία 5 το μέγιστο (8 καθοδικά έναντι 1 ανοδικού).

Στην εργασία αυτή αναλύεται η επίδραση που έχουν διαφορετικές λειτουργίες TDD στη λειτουργικότητα και απόδοση του συστήματος. Παράλληλα, το σύστημα μελετάται και σε σχέση με την επιλεγόμενη κωδικοποίηση και διαμόρφωση του φυσικού σήματος. Αυτό γίνεται βάσει της τιμής του συντελεστή I_{cs} όπως αυτός ορίζεται στο πρότυπο LTE. Ανάλογα με την τιμή του καθορίζεται η ποσότητα χρήσιμων δεδομένων που θα μεταδοθεί σε κάθε υποπλάισιο (ανοδικό ή καθοδικό). Η τιμή αυτή μπορεί να διαφέρει αν και ο φυσικός ρυθμός μετάδοσης σε κάθε υποπλάισιο είναι δεδομένος. Έτσι, η μετάδοση μπορεί να γίνει με διαφορετικούς λογους κωδικοποίησης. Εδώ αναλύεται το σύστημα με βάση κι τους δύο αυτούς

παράγοντες και εξετάζεται τόσο ο καθορισμός των σημείων λειτουργίας που επαρκούν για την εξυπηρέτηση της εισερχόμενης κίνησης των χρηστών, όσο και ο δυναμικός καθορισμός των TDD/ICMS που ελαχιστοποιούν την παρατηρούμενη καθυστέρηση.

Η οπτική γωνία της ανάλυσης περιλαμβάνει τόσο το φυσικό επίπεδο, όσο και το κατώτερα υποστρώματα του επιπέδου ζεύξης δεδομένων (MAC). Χρησιμοποιώντας γεγονοδηγούμενο προγραμματισμό, προσομοιώθηκε η κωδικοποίηση, η διαμόρφωση, η μετάδοση και η αποδιομόρφωση των πακέτων δεδομένων από τη στιγμή που φθάνουν στο buffer του παραλήπτη, μέχρι την επιτυχή λήψη του (ή την απόρριψη του). Οι μετρικές που εξήχθησαν από αυτή τη διαδικασία εκτείνονται πέρα από πολλαπλές μεταδόσεις και επαναμεταδόσεις μέχρι την ορθή λήψη στο άλλο άκρο της επικοινωνίας (ή την επίτευξη του μέγιστου αριθμού μεταδόσεων).

Οι μεταδόσεις στο LTE λαμβάνουν χώρα στα πλαίσια μίας διεργασίας HARQ, με βάση την οποία καθορίζεται η αρχική μετάδοση και οι τυχόν επαναμεταδόσεις ενός πακέτου δεδομένων. Μία τέτοια διεργασία περιλαμβάνει την αποστολή θετικών (ACK) ή αρνητικών (NACK) επιβεβαιώσεων από τον παραλήπτη στον αποστολέα κατά την αποδιομόρφωση των μεταδοθέντων δεδομένων. Ο συντονισμός αυτός είναι πιο δύσκολος στη λειτουργία TDD σε σχέση με τη λειτουργία FDD. Ο λόγος είναι ότι δεν είναι πάντα εφικτό να αποσταλεί η επιβεβαίωση όταν είναι έτοιμη προς μετάδοση, καθώς μερικές φορές χρειάζεται να παρέλθει κάποιος χρόνος ως την έλευση ενός υποπλαισίου με την απαιτούμενη κατεύθυνση των δεδομένων (καθοδική ή ανοδική).

Το θέμα αυτό έχει ληφθεί υπόψη στο μοντέλο μας και επηρεάζει τόσο την ανοδική όσο και την καθοδική κίνηση. Από την άλλη το θέμα της επικαιρότητας του buffer δεδομένων προς αποστολή είναι ένα θέμα που αφορά στην ανοδική κίνηση μόνο. Το πρόβλημα προκύπτει από το γεγονός ότι ο κόμβος eNodeB που είναι επιφορτισμένος με το χρονοπρογραμματισμό των δεδομένων δεν μπορεί να είναι άμεσα ενήμερος για την άφιξη δεδομένων προς μετάδοση στον εξοπλισμό του

χρήστη. Και σε αυτή την περίπτωση είναι πιθανό να μην είναι δυνατή η άμεση ενημέρωση του eNodeB από τον UE για τα εισερχόμενα δεδομένα, στην περίπτωση που πρέπει να παρέλθει κάποιος χρόνος μέχρι να υπάρξει διαθέσιμο ανοδικό υποπλαίσιο. Αυτός είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους οι χρόνοι καθυστέρησης για τα καθοδικά δεδομένα είναι γενικά μικρότεροι από τους αντίστοιχους για τα ανοδικά.

Ένα συμπέρασμα από τη μελέτη του συστήματος είναι η χαλαρή σύνδεση μεταξύ ανοδικής και καθοδικής κίνησης. Πραγματικά, πέρα από τις τιμές του δείκτη TDD και Icms, που αναφέρονται και στις δύο κατευθύνσεις, οι ανοδικές/καθοδικές ροές έχουν ξεχωριστό σύνολο από διεργασίες HARQ, ξεχωριστά buffer εισόδου, ξεχωριστές παραμέτρους εισερχόμενης κίνησης και ξεχωριστούς λόγους SNR. Η παρατήρηση αυτή επιτρέπει την εστίαση και την αποκλειστική μελέτη της καθοδικής ή της ανοδικής κίνησης και το συνδυασμό αποτελεσμάτων από κάθε περίπτωση με αυθαίρετο τρόπο. Σε κάθε περίπτωση οι επιτρεπτές τιμές δείκτη TDD/Icms από το συνδυασμό δύο επιμέρους περιπτώσεων από κάθε κατεύθυνση είναι η τομή των χωρίων επιτρεπτής λειτουργίας κάθε κατεύθυνσης ξεχωριστά.

Οι βασικές μετρικές που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, ο μέσος αριθμός επαναμεταδόσεων και το ποσοστό των πακέτων που απορρίφθηκαν λόγω επίτευξης του μέγιστου αριθμού μεταδόσεων. Η καθυστέρηση αφορά το χρόνο από τη στιγμή που τα δεδομένα φτάνουν στο buffer εισόδου για μετάδοση, μέχρι τη στιγμή της ορθής λήψης των δεδομένων από τον παραλήπτη. Τόσο αυτή, όσο και ο λόγος απόρριψης των εισερχόμενων πακέτων δεδομένων αποτελούν σημαντικές παραμέτρους κατά τον καθορισμό των χαρακτηριστικών των ροών. Η ανάλυση που γίνεται εδώ μπορεί να επεκταθεί ώστε συνοψολογίζει συγκεκριμένες (και πραγματικές) προδιαγραφές για καθορισμένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS).

Η επιλεγμένη λειτουργία TDD δεν έχει σημαντικό αντίκτυπο στο μέσο αριθμό μεταδόσεων ή στο λόγο απόρριψης πακέτων. Η πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης

εξαρτάται από τρεις παράγοντες: το διαθέσιμο ρυθμό μετάδοσης στο φυσικό επίπεδο, το μέγεθος σε bits των δεδομένων που μεταδίδονται και τις παραμέτρους του καναλιού και της μετάδοσης (SNR, διαμόρφωση κλπ). Η ποσότητα δεδομένων που μεταδίδονται σε ένα υποπλάισιο του LTE, καθώς και η διαμόρφωση που εφαρμόζονται καθορίζονται πλήρως από τον ορισμό του ICMS, μέσω πίνακα που περιέχεται στο πρότυπο. Η επιλογή της λειτουργίας TDD καθορίζει το πλήθος από διαθέσιμες ανοδικές/καθοδικές μεταδόσεις αλλά σε μικρό μόνο βαθμό την πιθανότητα επιτυχίας κάθε μίας από αυτές. Η επίδραση αυτή οφείλεται στην ύπαρξη καθοδικών υποπλαισίων με διαφορετικούς διαθέσιμους ρυθμούς φυσικής μετάδοσης δεδομένων λόγω της κατανάλωσης πόρων σε κάποια από αυτά για σήματα ελέγχου (πχ σήματα συγχρονισμού).

Ο ορισμός ενός δικτύου LTE είναι ιδιαίτερα πολύπλοκος καθώς περιλαμβάνει ένα μεγάλο σύνολο από κανόνες και ειδικές περιπτώσεις. Κατά συνέπεια το μοντέλο που προτείνεται εδώ περιλαμβάνει αναπόφευκτα πολλές γενικεύσεις και εξιδανικεύσεις. Υπάρχει λοιπόν μία σειρά από επεκτάσεις που θα μπορούσαν να διευρύνουν τα συμπεράσματα που έχουν εξαχθεί.

Μία παράμετρος που πρέπει να εξεταστεί είναι ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού. Στην ανάλυση που έγινε υιοθετήθηκε ένα σχήμα εκ περιτροπής (round robin). Για τον χρονοπρογραμματισμό κάθε υποπλαισίου η ανάθεση των πόρων ακολουθούσε τους χρήστες με μία δεδομένη σειρά. Αν κάποιος χρήστης δεν είχε δεδομένα για μετάδοση ή οι διαθέσιμοι πόροι δεν αρκούσαν για τα δεδομένα που ήθελε να μεταδώσει, τότε η διαδικασία επαναλαμβανόταν για τον επόμενο χρήστη.

Η μέθοδος χρονοπρογραμματισμού έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε συνδυασμό με την περίπτωση ύπαρξης πολλαπλών ροών με διαφορετικά χαρακτηριστικά κίνησης (πχ διαφορετικές ρυθμαποδόσεις, διαφορετικοί λόγοι ανοδικής/καθοδικής κίνησης, διαφορετικές ποιότητες υπηρεσίας) ή καναλιού μετάδοσης (πχ SNR). Σε μία τέτοια περίπτωση, το πρόβλημα είναι σύνθετο και συχνά δεν επιδέχεται κατηγορηματικής

απάντησης. Για παράδειγμα, κάποιες μέθοδοι χρονοπρογραμματισμού μπορεί να δίνουν καλύτερη αξιοποίηση του δικτύου, αλλά σε βάρος της δικαιοσύνης των χρηστών με μικρότερες απαιτήσεις σε ρυθμαπόδοση.

Μία ακόμη επιλογή επέκτασης της ανάλυσης που γίνεται εδώ είναι και η πιο ρεαλιστική μοντελοποίηση του καναλιού της μετάδοσης. Κατά την προσομοίωση υπάρχει ένας αριθμός από φυσικά φαινόμενα και παράμετροι, όπως είναι η θέση των χρηστών, η εξασθένιση του καναλιού (channel fading) και η κινητικότητα, η επίδραση των οποίων μοντελοποιείται μέσω της τιμής του φαινόμενου λόγου SNR. Σε μία δεύτερη ανάλυση θα ήταν επιθυμητή η εξερεύνηση της επίδρασης αυτών των χαρακτηριστικών στην απόδοση του συστήματος.

Με τον ορισμό τιμών για αυτές τις παραμέτρους είναι δυνατή και η μελέτη της επικοινωνίας σε δίκτυα που περιλαμβάνουν περισσότερους από έναν κόμβο eNodeB. Σημαντική σε αυτή την περίπτωση είναι η μελέτη της επίδρασης της παρεμβολής στην επικοινωνία μεταξύ χρηστών εξαιτίας της ύπαρξης επικαλυπτόμενων κελιών. Με τον καθορισμό των παραμέτρων της επικοινωνίας βάσει της θέσης και ενδεχομένως και της ταχύτητας των χρηστών είναι η δυνατή η μελέτη της παρεμβολής και καθορισμός της επίδρασης του λόγου σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SNIR) στην απόδοση του συστήματος. Η παρεμβολή αυτή αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό θέμα για τη λειτουργία TDD.

Πέρα από την περιγραφή της επίδρασης των παραμέτρων λειτουργίας στην απόδοση του συστήματος, στόχος αυτής της εργασίας ήταν η μελέτη των μεθόδων και των προβλημάτων που σχετίζονται με την επιλογή της κατάστασης λειτουργίας με έναν ορθολογικό τρόπο. Το βασικό συμπέρασμα που προέκυψε από αυτή την ανάλυση είναι η σημασία της συλλογής αντιπροσωπευτικών δεδομένων, ώστε να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία καθορισμού της βέλτιστης λειτουργίας. Ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος σε σχέση με αυτό είναι το ύψος και η χρονική κλίμακα των διακυμάνσεων των μετρικών που συλλέγονται. Οι διακυμάνσεις αυτές αποτελούν σημαντικό παράγοντα τόσο κατά την εκτέλεση μοντέλων με ιδεατά χαρακτηριστικά

κίνησης όσο και κατά την επιλογή των βέλτιστων συνθηκών βάσει πραγματικών ροών.

Δύο βασικά μεγέθη που αναπτύχθηκαν εδώ είναι ο συντελεστής επιβάρυνσης λειτουργίας και ο συντελεστής επιβάρυνσης εξερεύνησης. Ο πρώτος σχετίζεται με την άγνοια της βέλτιστης κατάστασης και την ανάγκη λειτουργίας σε μη βέλτιστες συνθήκες εξαιτίας αυτού. Ο δεύτερος έχει να κάνει με την ανάγκη δοκιμής νέων καταστάσεων λειτουργίας ώστε να είναι δυνατή η σύγκλιση στο ολικά βέλτιστο σημείο λειτουργίας, αλλά και η προσαρμογή του συστήματος στις μεταβαλλόμενες συνθήκες. Το μέτρο των δύο συντελεστών δίνουν την απόκλιση που παρατηρείται μεταξύ των μέσων καθυστερήσεων που σημειώνονται σε σχέση με την πραγματικά ελάχιστη τιμή και ιδανικά θα πρέπει να προσεγγίζουν τη μονάδα. Η επίδραση πάντως του συντελεστή επιβάρυνσης λειτουργίας μπορεί να μετριαστεί ελαττώνοντας το λόγο του χρόνου εξερεύνησης προς το χρόνο λειτουργίας του συστήματος.

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στηρίζεται στην περιοδική εξέταση των μετρικών λειτουργίας σε μία νέα κατάσταση και η αποδοχή της κατάστασης αυτής ή όχι ανάλογα με τη βελτίωση ή μη της καθυστέρησης που παρατηρείται. Η πιθανότητα αποδοχής αποτελεί μία συνάρτηση του λόγου καθυστέρησης της τρέχουσας προς νέας κατάστασης. Η συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε ήταν η λογιστική συνάρτηση. Οι παράμετροι αυτής επιλέχθηκαν μετά από τη δοκιμή τυχαίων αναθέσεων τιμών και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από αυτές. Η συμπεριφορά της συνάρτησης που προέκυψε μπορεί να συνοψιστεί ως εξής: Αν οι νέες συνθήκες λειτουργίας οδηγούν σε καλύτερη απόδοση, τότε γίνονται αποδεκτές με πιθανότητα 1. Αν η απόδοση είναι χειρότερη τότε γίνονται αποδεκτές με μία πιθανότητα μικρότερη από 1. Η πιθανότητα αυτή παρουσιάζει μία απότομη μείωση όσο η νέα κατάσταση γίνεται χειρότερη από την υφιστάμενη. Για τιμή του λόγου υφιστάμενης προς νέας καθυστέρησης ίση με 0.8 η πιθανότητα είναι περίπου 0.1.

Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε σε πραγματικά δεδομένα κίνησης VoIP και RealMedia. Εξετάζοντας τα χαρακτηριστικά αυτών εντοπίζονται δύο σημαντικές

διαφορές. Από τη μία η κίνηση VoIP είναι ισορροπημένη σε σχέση με το καθοδικό και το ανοδικό της κομμάτι. Αντίθετα η κίνηση RealMedia είναι πολύ έντονα ασύμμετρη με το καθοδικό της κομμάτι να ανέρχεται σε περίπου 220 kbps ενώ το καθοδικό σε μόλις 7.8 kbps. Μία δεύτερη σημαντική διαφορά είναι οι μικρότεροι χρόνοι μεταξὺ των αφίξεων των πακέτων δεδομένων στην κίνηση VoIP σε σχέση με την κίνηση RealMedia.

Το γεγονός αυτό έχει επίδραση στο χρονικό διάστημα που είναι απαραίτητο για τη λήψη αξιόπιστων στατιστικών ώστε να καθοριστεί το βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Για την περίπτωση της κίνησης VoIP μία τιμή του διαστήματος αυτού ίση με 250 ms δίνει πολύ καλά αποτελέσματα. Για την περίπτωση της κίνησης RealMedia ωστόσο ο απαιτούμενος χρόνος είναι της τάξης των 750 ms.

Το πρόβλημα των διακυμάνσεων μικρής χρονικής κλίμακας υπεισέρχεται σε κάθε μεθοδολογία που στηρίζεται στη λήψη δοκιμαστικών μετρήσεων για τον καθορισμό της βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος. Η προφανής εναλλακτική είναι η χρήση μεγαλύτερων διαστημάτων λήψης μετρήσεων. Αυτό ωστόσο μπορεί να είναι ανεπιθύμητο για μία σειρά από λόγους. Κατ' αρχάς η εξερεύνηση νέων σημείων λειτουργίας εμπεριέχει ένα κόστος καθώς περιλαμβάνει τη λειτουργία σε μη βέλτιστες συνθήκες. Είναι λοιπόν επιθυμητή η όσο το δυνατόν συντομότερη διάρκειά της. Επιπλέον, η χρήση μεγαλύτερων διαστημάτων δειγματοληψίας μπορεί μαζί με την επιθυμητή εξομάλυνση των βραχυπρόθεσμων διακυμάνσεων να απαλείψει και τις μεσοπρόθεσμες αλλαγές λόγω μεταβολής της κίνησης. Στην περίπτωση αυτή δεν είναι δυνατή η δυναμική προσαρμογή στις συνθήκες του δικτύου και το σύστημα λειτουργεί και πάλι σε μη βέλτιστες συνθήκες.

Μία προσέγγιση που θα μπορούσε να βοηθήσει στην αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι η διατήρηση μίας τιμής για την καθυστέρηση σε κάθε σημείο λειτουργίας η οποία να στηρίζεται στις τιμές καθυστέρησης για προηγούμενες χρονικές περιόδους. Σε αυτό το πρόβλημα υπεισέρχεται ένα σύνολο από ζητήματα που έχουν να κάνουν με τη βαρύτητα των παλιών μετρήσεων σε σχέση με τις νέες

και την επιλογή του σημείου για το οποίο θα ληφθούν οι μετρήσεις και τη χρονική στιγμή που θα γίνει αυτό. Παρόλο, λοιπόν που αποτελεί άμεση επέκταση των ιδεών που αναπτύσσονται σε αυτή την εργασία, παραμένει έξω από τα πλαίσιά της.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] 3GPP TS 23.401, “Technical Specification Group Services and System Aspects; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network.”
- [2] 3GPP TS 23.203, “Policy and charging control architecture.”
- [3] 3GPP TS 36.331, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Radio Resource Control (RRC); Protocol specification.”
- [4] 3GPP TS 36.323, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification.”
- [5] 3GPP TS 36.321, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Medium Access Control (MAC) protocol specification.”
- [6] 3GPP TS 36.211, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation.”
- [7] 3GPP TS 36.213, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures.”
- [8] 3GPP TS 36.212, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding.”
- [9] M. Alard and R. Halbart-Lassal, “Principles of Modulation and Channel Coding for Digital Broadcasting for Mobile Receivers,” *EBU Review*, vol. 224, pp. 47–69, Aug. 1987.
- [10] H. Sari, G. Karam, and I. Jeanclaude, “Channel Equalization and Carrier Synchronization in OFDM systems,” *Audio and Video Digital Radio Broadcasting Systems and Technique*, pp. 191–202, 1994.
- [11] H. Sari, G. Karam, and I. Jeanclaude, “Transmission Techniques for Digital Terrestrial TV Broadcasting,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 33, pp. 100–109, Feb. 1995.
- [12] H. Sari, Y. Levy, and G. Karam, “Orthogonal Frequency-Division Multiple Access for the Return Channel on CATV Networks,” *ICT’96 Conf. Rec.*, vol. 1, pp. 52–57, Apr. 1996.
- [13] H. Sari and G. Karam, “Orthogonal frequency-division multiple access and its application to CATV networks,” *European Transactions on Telecommunications*, vol. 9, no. 6, pp. 507–516, Nov. 1998.

- [14] H. Sari, "Orthogonal Frequency-Division Multiple Access with Frequency Hopping and Diversity," in *Multi-Carrier Spread-Spectrum*, K. Fazel and G. P. Fettweis, Eds. Boston, MA: Springer US, 1997, pp. 57–68.
- [15] J. C. Ikuno, M. Wrulich, and M. Rupp, "Performing and modeling on LTE H-ARQ," *Proc ITG International Workshop on Smart Antennas (WSA), Berlin, Germany*, Feb. 2009.
- [16] J. C. Ikuno, M. Wrulich, and M. Rupp, "System Level Simulation of LTE Networks," 2010, pp. 1–5.
- [17] P. Muñoz, la B. I. de, F. Ruiz, S. Luna-Ramírez, R. Barco, M. Toril, P. Lázaro, and J. Rodríguez, "Computationally-Efficient Design of a Dynamic System-Level LTE Simulator," *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 57, no. 3, pp. 347–358, 2011.
- [18] P. Muñoz, I. de la Bandera, R. Barco, F. Ruiz, M. Toril, and S. Luna-Ramírez, "Estimation of link-layer quality parameters in a system-level LTE simulator," in *2010 Fifth International Conference on Broadband and Biomedical Communications (IB2Com)*, 2010, pp. 1–5.
- [19] J. J. Olmos Bonafé, A. Serra, S. Ruiz Boqué, M. García Lozano, and D. González González, "Link level simulator for LTE downlink," presented at the 7th European Meeting COST-2100. Pervasive Mobile & Ambient Wireless Communications, 2009.
- [20] J. Wu, Z. Yin, J. Zhang, and W. Heng, "Physical layer abstraction algorithms research for 802.11n and LTE Downlink," in *2010 International Symposium on Signals Systems and Electronics (ISSSE)*, 2010, vol. 1, pp. 1–4.
- [21] M. Mezzavilla, M. Miozzo, M. Rossi, N. Baldo, and M. Zorzi, "A Lightweight and Accurate Link Abstraction Model for the Simulation of LTE Networks in Ns-3," in *Proceedings of the 15th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, New York, NY, USA, 2012, pp. 55–60.
- [22] C. Mehlhüner, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska, and M. Rupp, "Simulating the Long Term Evolution physical layer," in *Signal Processing Conference, 2009 17th European*, 2009, pp. 1471–1478.
- [23] C. Mehlhüner, J. C. Ikuno, M. Šimko, S. Schwarz, M. Wrulich, and M. Rupp, "The Vienna LTE simulators - Enabling reproducibility in wireless communications research," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 29.

- [24] G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, F. Capozzi, and P. Camarda, "Simulating LTE Cellular Systems: An Open-Source Framework," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 2, pp. 498–513, Feb. 2011.
- [25] F. Capozzi, G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, and P. Camarda, "On accurate simulations of LTE femtocells using an open source simulator," *J Wireless Com Network*, vol. 2012, no. 1, pp. 1–13, Oct. 2012.
- [26] F. Capozzi, G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, and P. Camarda, "A System-level Simulation Framework for LTE Femtocells," in *Proceedings of the 5th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*, ICST, Brussels, Belgium, Belgium, 2012, pp. 211–213.
- [27] G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, R. Fortuna, and P. Camarda, "Two-Level Downlink Scheduling for Real-Time Multimedia Services in LTE Networks," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 13, no. 5, pp. 1052–1065, Oct. 2011.
- [28] J. Li, S. Farahvash, M. Kavehrad, and R. Valenzuela, "Dynamic TDD and fixed cellular networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 4, no. 7, pp. 218–220, Jul. 2000.
- [29] C. Yu, W. Xiangming, L. Xinqi, and Z. Wei, "Research on the modulation and coding scheme in LTE TDD wireless network," in *International Conference on Industrial Mechatronics and Automation, 2009. ICIMA 2009, 2009*, pp. 468–471.
- [30] A. Khoryaev, A. Chervyakov, M. Shilov, S. Panteleev, and A. Lomayev, "Performance analysis of dynamic adjustment of TDD uplink-downlink configurations in outdoor picocell LTE networks," in *2012 4th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2012*, pp. 914–921.
- [31] J. Brown and J. Y. Khan, "Performance comparison of LTE FDD and TDD based Smart Grid communications networks for uplink biased traffic," in *2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2012*, pp. 276–281.
- [32] R. Susitaival, H. Wiemann, J. Östergaard, and A. Larmo, "Internet Access Performance in LTE TDD," in *Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring), 2010 IEEE 71st, 2010*, pp. 1–5.