



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙ-
ΚΩΝ

**Βελτίωση της Διαθεσιμότητας Ζεύξεων Κορμού 5ης Γενιάς με
Χρήση Τεχνικών Άμβλυνσης Διαλείψεων και Τεχνικών Πολλαπλών
Κεραιών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Γιάτσος
Βασιλική Τρικήλη

Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟ-
ΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Βελτίωση της Διαθεσιμότητας Ζεύξεων Κορμού 5ης Γενιάς με
Χρήση Τεχνικών Άμβλυνσης Διαλείψεων και Τεχνικών Πολλαπλών
Κεραιών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Γιάτσος
Βασιλική Τρικάλη

Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 3 Μαρτίου 2023.

.....
Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Φικιώρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023

.....

Κωνσταντίνος Γιάτσος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

.....

Βασιλική Τρικάλη

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κωνσταντίνος Γιάτσος, Τρικάλη Βασιλική, 2023.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στους συγγραφείς στις ηλεκτρονικές διευθύνσεις vasia.trikali@gmail.com και kostakisbp@hotmail.com.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την περιγραφή και μελέτη της επίδοσης των τεχνικών άμβλυνσης διαλείψεων στην διαθεσιμότητα των ζεύξεων κορμού 5^{ης} γενιάς.

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται η εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα 5^{ης} γενιάς, στην πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική τους, στις βασικές έννοιες και εφαρμογές τους. Στο 2^ο κεφάλαιο, παρουσιάζεται και αναλύεται η βασική αρχιτεκτονική της οπισθοζευκτικής επικοινωνίας (backhauling), η διαδικασία σχεδιασμού RAN (Radio Access Network) Backhaul 2G και η εξέλιξη των τεχνολογιών που στοχεύουν στην κάλυψη των απαιτήσεων για την σχεδίαση LTE RAN Backhaul.

Στο 3^ο κεφάλαιο, πραγματοποιείται η ανάλυση των προκλήσεων για το backhaul κατά την εξέλιξη του σχεδιασμού του. Παρουσιάζονται οι κύριες ερευνητικές κατευθύνσεις λύσεων των παρόχων υπηρεσιών δικτύου που αφορούν την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού RAN Backhaul για την άρση της συμφόρησης του δικτύου και τα δύο μοντέλα κίνησης που μετρούν την ρυθμαπόδοση backhaul.

Στο 4^ο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το πειραματικό μέρος της εργασίας. Μοντελοποιούνται τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης που θεωρείται το κυρίαρχο πρόβλημα διάδοσης στις μικροκυματικές συχνότητες μέσω των συστάσεων της ITU-R και αναλύονται οι τεχνικές διαφορισμού χρόνου, χώρου και πολλαπλών κεραιών. Έπειτα, μέσω προσομοίωσης στο MATLAB και λαμβάνοντας δεδομένα βροχόπτωσης για ελληνικές πόλεις αποτυπώνονται με διαγράμματα τα αποτελέσματα για την πιθανότητα υπέρβασης λόγω βροχόπτωσης και την χωρητικότητα αποκοπής με την χρήση των τεχνικών διαφορισμού.

Τέλος, στο 5^ο κεφάλαιο, παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα των backhaul δικτύων 5^{ης} γενιάς.

Λέξεις Κλειδιά

Οπισθοζευκτική επικοινωνία, 5G, αρχιτεκτονική backhaul, προκλήσεις backhaul δικτύου, τεχνικές άμβλυνσης διαλείψεων, πιθανότητα υπέρβασης, χωρητικότητα αποκοπής, επίδοση συστήματος, επίγεια δίκτυα.

Abstract

This thesis deals with the description and study of the performance of fading mitigation techniques on the availability of 5th generation backhaul links.

Chapter 1 introduces 5th generation wireless networks, their multi-layered architecture, basic concepts, and applications. In Chapter 2, the basic architecture of backhauling, the Radio Access Network (RAN) Backhaul 2G design process and the evolution of technologies aimed at meeting the requirements for LTE RAN Backhaul design are presented and discussed.

In Chapter 3, an analysis of the challenges for the backhaul network during its design evolution is carried out. The main research directions of network service providers' solutions concerning the optimization of RAN backhaul design to alleviate network congestion and the two traffic models that measure backhaul throughput are presented.

In Chapter 4, the experimental part of the thesis is carried out. The characteristics of rainfall, which is considered the dominant propagation drawback in microwave frequencies through the ITU-R recommendations, are modelled and the time, space and multiple antenna diversity techniques are analyzed. Then, through simulation in MATLAB and taking rainfall data for greek cities, the results of exceedance probability due to rainfall and the outage capacity using the diversity techniques are plotted.

Finally, in Chapter 5, proposals for future research on 5th generation backhaul networks are presented.

Key Words

Backhaul communication, 5G, backhaul architecture, network backhaul challenges, fading mitigation techniques, exceedance probability, outage capacity, system performance, terrestrial networks.

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο, Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε στην ανάθεση της εργασίας και την ευκαιρία που μας έδωσε να ασχοληθούμε εκτενέστερα με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Τον ευχαριστούμε θερμά για την συνεχή καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές που μας παρείχε όλο αυτό το διάστημα.

Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους καθηγητές μας κ. Παναγιώτη Κωττή, ο οποίος ήταν ο πρώτος καθηγητής που μας εισήγαγε στο κομμάτι των τηλεπικοινωνιών και μας ενέπνευσε να ακολουθήσουμε τον συγκεκριμένο τομέα, τον κ. Γεώργιο Φικιώρη για τις γνώσεις που μας παρείχε στο σημαντικό κομμάτι των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και τον κ. Χρήστο Καψάλη για τις γνώσεις που μας παρείχε στα πεδία των κεραιών, ασύρματων ζεύξεων και δορυφορικών επικοινωνιών. Η συμβολή όλων των καθηγητών μας ήταν σημαντική καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μας πορείας.

Ακόμη, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ο καθένας ξεχωριστά τους γονείς μας Χρήστο και Αλεξάνδρα, Αλέξανδρο και Κωνσταντία και τα αδέρφια μας, Σοφία και Άρη για την πλήρη στήριξη και την αγάπη τους όλα αυτά τα χρόνια. Μαζί με αυτούς ευχαριστούμε τους ανθρώπους της ζωής μας, Δημήτρη και Ραφαέλα που είναι πάντα δίπλα μας και τους καρδιακούς μας φίλους Χρύσα, Νικολέτα, Μαριάννα, Ηλιάνα, Ευαγγελία, Κωνσταντίνα, Κατερίνα, Θεόδωρο, Στέργιο, Άκη.

Τέλος, θα θέλαμε να αναφέρουμε πως η παρούσα διπλωματική αφιερώνεται στις οικογένειες μας.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	vii
Λέξεις Κλειδιά	vii
Abstract	viii
Key Words.....	viii
Πίνακας περιεχομένων.....	xi
1 Κεφάλαιο: Τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Εισαγωγή στις έννοιες του δικτύου 5G και στις διεπαφές αέρα	2
1.2.1 Οι έννοιες των <i>backhaul</i> και <i>fronthaul</i>	3
1.2.2 Η έννοια της μικρής κυψέλης	4
1.3 Πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική δικτύων 5G	4
1.4 Διεπαφή του αέρα.....	5
1.5 Μη αδειοδοτημένο WiFi για δίκτυα 5G.....	5
1.6 Δίκτυα Οχημάτων.....	6
2 Κεφάλαιο: Η εξέλιξη του δικτύου ραδιοπρόσβασης Backhaul.....	8
2.1 Εισαγωγή.....	8
2.2 Βασική Αρχιτεκτονική στην Backhaul ζεύξη	8
2.3 Διαδικασία Σχεδιασμού της RAN Backhaul.....	9
2.4 Εξέλιξη Τεχνολογιών RAN Backhaul.....	11
2.4.1 Συσκευή Τοποθεσίας Κυψέλης (<i>Cell site device</i>)	11
2.4.2 Συσκευή Τοποθεσίας Κόμβου (<i>Hub Site Device</i>)	14
2.4.3 Συσκευή Τοποθεσίας Γραφείου Κινητής Μεταφοράς (<i>MSO site device</i>).....	14
2.5 Βασική αρχιτεκτονική της LTE RAN backhaul.....	15
2.6 Ειδικές Απαιτήσεις RAN backhaul για το LTE και επιλογές σχεδίασης.....	18

2.6.1	Συνολική Απαίτηση Εύρους Ζώνης στην Τοποθεσία Κυψέλης.....	18
2.6.2	Υποστήριξη για την διεπαφή X2 και ασφάλεια τομέα δικτύου μέσω IP_{SEC} 19	
2.6.3	Κατανομή Συχνότητας και Συγχρονισμός Φάσης	20
2.6.4	Σχεδιασμός Μικρών Κυψελών	23
2.6.5	Αυτό-οργανωμένο Δίκτυο	23
2.6.6	Διαχείριση QoS	25
3	Κεφάλαιο: Προκλήσεις για το backhaul δίκτυο και μοντέλα κίνησης	26
3.1	Εισαγωγή.....	26
3.2	Προκλήσεις και εξέλιξη της αρχιτεκτονικής backhaul	26
3.3	Οι κύριες ερευνητικές κατευθύνσεις στις τεχνολογίες backhaul	30
3.3.1	Εξελίξεις στα οπτικά δίκτυα	31
3.3.2	Μικροκυματική ζώνη στη backhaul.....	33
3.3.3	SDN στη backhaul.....	35
3.3.4	Ενεργειακή αποδοτικότητα στη backhaul	37
3.3.5	Προσωρινή αποθήκευση δεδομένων στη backhaul	38
3.3.6	Κοινός σχεδιασμός και βελτιστοποίηση του RAN/Backhaul.....	39
3.4	Μοντέλα κίνησης backhaul.....	41
3.4.1	Μοντέλο κίνησης backhaul σε κεντρικές λύσεις	42
3.4.2	Μοντέλο κίνησης backhaul σε λύσεις διανομής.....	43
4	Κεφάλαιο: Προβλήματα διάδοσης στις μικροκυματικές συχνότητες και τεχνικές άμβλυνσης διαλείψεων για επίγεια δίκτυα.....	44
4.1	ITU-R P.837-6: Χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης για τη μοντελοποίηση της διάδοσης 44	
4.1.1	Μοντέλο για την εξαγωγή του ποσοστού βροχόπτωσης υπέρβασης για μια δεδομένη πιθανότητα του μέσου έτους και μια δεδομένη τοποθεσία.....	45
4.2	4.2 ITU-R P.838-3: Ειδικό μοντέλο εξασθένησης της βροχής για χρήση σε μεθόδους πρόβλεψης.....	47
4.3	Διαφορισμός χρόνου (Time diversity)	50
4.3.1	Προτεινόμενο μοντέλο πρόβλεψης για την τεχνική TD.....	52
4.3.2	Προσομοίωση για την τεχνική διαφορισμού χρόνου (time diversity).....	55
4.4	Τεχνική Διαφορισμού Χώρου (Site Diversity).....	62

4.4.1	<i>Απόδοση συστήματος διαφορισμού χώρου (site diversity)</i>	63
4.4.2	<i>Κέρδος συστήματος διαφορισμού χώρου.....</i>	65
4.4.3	<i>Προσομοίωση συστήματος διαφορισμού χώρου</i>	65
4.5	<i>Προσέγγιση της χωρητικότητας αποκοπής που επιτυγχάνεται στις ευρυζωνικές ζεύξεις SIMO, MISO και MIMO καναλιών</i>	69
4.5.1	<i>Ανάλυση της χωρητικότητας αποκοπής με τις τεχνικές SIMO και MISO.....</i>	70
4.5.2	<i>SIMO/MISO Μοντέλο ευρυζωνικού καναλιού</i>	72
4.5.3	<i>Ανάλυση της χωρητικότητας αποκοπής για MISO, SIMO συστήματα....</i>	73
4.5.4	<i>Μοντέλο καναλιού MIMO.....</i>	76
4.5.5	<i>Ανάλυση της χωρητικότητας αποκοπής σε MIMO συστήματα</i>	78
4.5.6	<i>Προσομοίωση της χωρητικότητας αποκοπής που επιτυγχάνεται στις ευρυζωνικές ζεύξεις SIMO, MISO σε επίγεια συστήματα</i>	79
5	Κεφάλαιο: Μελλοντικές προοπτικές και ανοιχτά ερευνητικά θέματα για τα backhaul δίκτυα 5^{ης} γενιάς	81
5.1	<i>Προκλήσεις στα κινούμενα δίκτυα</i>	81
5.1.1	<i>Ασφάλεια κινούμενων δικτύων.....</i>	83
5.1.2	<i>Ενεργειακή απόδοση σε κινούμενες κυψέλες.....</i>	84
5.1.3	<i>Πρακτικές θεωρήσεις κινούμενων κυψελών.....</i>	85
5.1.4	<i>Μη επίγεια δίκτυα (NTN - Non Terrestrial Network) που υποστηρίζονται από backhaul ζεύξεις.....</i>	85
5.2	<i>MPLS στην τοποθεσία κυψέλης.....</i>	87
5.3	<i>RAN backhaul μέσω xDSL.....</i>	88
5.4	<i>LTE: ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ IP.....</i>	90
	Βιβλιογραφία.....	94

Πίνακας Σύντομεύσεων

ARN	Active Remote Node
ARP	Allocation Retention Priority
ARQ	Automatic Repeat Request
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BBU	BaseBand Unit
BRAS	Broadband Remote Access Server
BS	Base Station
BSC	Base Station Controller
BTS	Base Transceiver Station
BWA	Broad-Band Wireless Access
CapEX	Capital Expenditure
CO	Central Office
CoMP	Coordinated MultiPoint
CPRI	Common Public Radio Interface
C-RAN	Centralized Radio Access Network
CSDG	Cell-Site Diversity Gain
CSR	Cell Site Router
D2D	Device to Device
DBA	Dynamic Bandwidth Allocation
DCS	Digital Cross-connect Switches
DiffServ	Differentiated Service
DL	DownLink
DL	Deep Learning
D-RAN	Distributed Radio Access Network
D-RoF	Digital Radio over Fiber
DSCP	Differentiated Service Code Point
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DSRC	Dedicated Short Range Communication
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

EF	Expendited Forwarding
eICIC	enhanced Inter-Cell Intereference Coordination
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power
EPC	Evolved Packet Core
EPCR	Evolved Packet Core Router
EPS	Evolved Packet System
eUTRAN	enhanced Universal Terrestrial Radio Access Network
EV-DO	Evolution Data Optimized
FBMC	Filter Bank MultiCarrier
FCC	Federal Communications Commision
FDD	Frequency Division Duplex
FMT	Fade Mitigation Technique
FTTB	Fiber To The Building
FTTH	Fiber To The Home
Gbps	Gigabit per second
GDPR	General Data Protection Regulation
GEO	Ground Earth Orbit
GFDM	General Frequency Division Multiplexing
GPON	Gigabit Passive Optical Network
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
HAP	High Altitude Platform
HDLC	High-level Data Link Control
HDTV	High Definition Television
HetNet	Heterogenous Network
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
IaaS	Infrastructure as a Service
ICIC	Inter-Cell Intereference Coordination
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things

IP	Internet Protocol
IPSec	Internet Protocol Security
ITS	Intelligent Transport System
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	International Telecommunication Union Radio-communication Sector
LAN	Local Access Network
Lat	Latitude
LEO	Low Earth Orbit
LMDS	Local Multipoint Distributed System
Lon	Longitude
LOS	Line Of Sight
LTE	Long Term Evolution
LTE-R	Long Term Evolution Railway
MAC	Medium Access Control
MBS	Macrocell Base Station
MBSFN	Multicast Broadcast Single Frequency Network
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
ML	Machine Learning
MME	Mobility Management Entity
MPLS	MultiProtocol Label Switching
MSO	Mobile Switching Office
MSR	Multi-Service Router
multi-RAT	multi Radio Access Technology
NEC	National Electrical Code
NFV	Network Function Virtualization
NGFI	Next Generation Fronthaul Interface
NGMN	Next Generation Mobile Network
NLOS	Non Light Of Sight
NTN	Non Terrestrial Network
OFDM	Orthogonal Frequency Division Model

ONF	Open Networking Foundation
ONU	Optical Network Unit
OpEX	Operational Expenditure
OTFS	Orthogonal Time Frequency Space
OTN	Optical Transport Network
PCC	Policy and Charging Control
P-GW	Packet Data Network Gateway
PHY	Physical Layer
PON	Passive Optical Network
POTS	Packet Optical Transport System
PPP	Point-to-Point Protocol
PS	Packet Switched
PtmP	Point to multiPoint
PTP	Precision Time Protocol
QCI	Quality of Service Class Identifier
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RANaaS	Radion Access Network as a Service
RAT	Radio Access Technology
RF	Radio Frequency
RNC	Radio Network Controller
RRH	Remote Radio Head
RRU	Remote Radio Unit
SAE	System Architecture Evolution
SBS	Smallcell Base Station
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDN	Software Defined Network
SGSN	Servicing GPRS Supporting Nodes
SGW	Service Gateway
SIMO	Single Input Multiple Output
SISO	Single Input Single Output

SLA	Service Level Agreement
SON	Self Organized Network
SONET	Synchronous Optical Network
SyncE	Synchronous Ethernet
TD	Time Diversity
TDD	Time Division Duplex
TDM	Time Division Multiplexing
TIA	Telecommunication Industry Association
TWDM	Time and Wavelength Division Multiplexing
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UDN	Ultra Dense Network
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	Vehicle to Vehicle
VANET	Vehicular Ad hoc Network
VDSL	Very high-speed Digital Subscriber Line
VLAN	Virtual Local Access Network
VNF	Virtualized Network Function
VoIP	Voice over Internet Protocol
VoLTE	Voice over Long-Term Evolution
VPL	Vehicular Penetration Loss
VPN	Virtual Private Network
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

Ευρετήριο Σχημάτων

1 Κεφάλαιο: Τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς

Σχήμα 1.1 Η πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική του 5G.....	2
---	---

2 Κεφάλαιο: Η εξέλιξη του δικτύου ραδιοπρόσβασης Backhaul

Σχήμα 2.1 Γενική αρχιτεκτονική αναφοράς RAN backhaul.....	8
Σχήμα 2.2 Διαδικασία σχεδιασμού RF και μηχανικής κίνησης που παρέχει απαιτούμενες εισροές για το σχεδιασμό RAN backhaul.....	10
Σχήμα 2.3 Εξέλιξη των διεπαφών BTS/κόμβου B.....	12
Σχήμα 2.4 Αρχιτεκτονική αναφοράς LTE RAN backhaul.....	16
Σχήμα 2.5 (α) Ενσωματωμένος, (b) Επιλογές μεταφοράς επικάλυψης Ethernet για LTE backhaul	17
Σχήμα 2.6 Επιλογές για το χειρισμό της διεπαφής X2 και του τερματισμού IPsec στο πλαίσιο του backhaul.....	19
Σχήμα 2.7 Διανομή συγχρονισμού συχνότητας και φάσης εντός του backhaul.....	22
Σχήμα 2.8 Συντονισμός της λειτουργίας SON εντός του ραδιοτομέα και του τομέα backhaul.....	23

3 Κεφάλαιο: Προκλήσεις για το backhaul δίκτυο και μοντέλα κίνησης

Σχήμα 3.1 Ο BSC και ο RNC συνυπάρχουν και χρησιμοποιούνται ως σημεία συγκέντρωσης για τους BTS, Node B και eNB backhaul ζεύξης.....	29
Σχήμα 3.2 Παράδειγμα δικτύου 5G κινητής τηλεφωνίας backhaul που αποτελείται από fronthaul, midhaul και παραδοσιακό backhaul.....	30

4 Κεφάλαιο: Προβλήματα διάδοσης στις μικροκυματικές συχνότητες και τεχνικές άμβλυνσης διαλείψεων για επίγεια δίκτυα

Σχήμα 4.1 Συντελεστής k για οριζόντια πόλωση.....	50
Σχήμα 4.2 Συντελεστής α για οριζόντια πόλωση.....	50
Σχήμα 4.3 Συντελεστής k για κάθετη πόλωση.....	51
Σχήμα 4.4 Συντελεστής α για κάθετη πόλωση.....	51

Σχήμα 4.5 Εφαρμογή της τεχνικής TD.....	53
Σχήμα 4.6 Κλιματική διαφορά μεταξύ των ελληνικών πόλεων.....	58
Σχήμα 4.7 Γραμμική προσαρμογή δεδομένων (Z,U) για τα Χανιά.....	59
Σχήμα 4.8 Time Diversity για Αθήνα, συχνότητα 20 GHz, μήκος ζεύξης 1km.....	60
Σχήμα 4.9 Time Diversity για Αθήνα, συχνότητα 50 GHz, μήκος ζεύξης 1km.....	60
Σχήμα 4.10 Time Diversity Αθήνα, συχνότητα 40 GHz, μήκος ζεύξης 1km.....	61
Σχήμα 4.11 Time Diversity Αθήνα, συχνότητα 40 GHz, μήκος ζεύξης 3km.....	61
Σχήμα 4.12 Κέρδος διαφορισμού για τις συχνότητες 20 GHz και 40 GHz (Ιωάννινα).....	63
Σχήμα 4.13 Κέρδος διαφορισμού για πιθανότητες διαθεσιμότητας 99.9% και 99.95%.....	63
Σχήμα 4.14 Διάρθρωση του συστήματος διαφορισμού χώρου.....	66
Σχήμα 4.15 Site Diversity για Ιωάννινα, συχνότητα 20 GHz, μήκη ζεύξεων $L_1 = 3$ km και $L_2 = 3$ km.....	68
Σχήμα 4.16 Site Diversity για Ιωάννινα, συχνότητα 50 GHz, μήκη ζεύξεων $L_1 = 3$ km και $L_2 = 3$ km.....	69
Σχήμα 4.17 Site Diversity για Χανιά, συχνότητα 30 GHz, μήκη ζεύξεων $L_1 = 1$ km και $L_2 = 1$ km.....	69
Σχήμα 4.18 Site Diversity για Χανιά, συχνότητα 30 GHz, μήκη ζεύξεων $L_1 = 3$ km και $L_2 = 3$ km.....	70
Σχήμα 4.19 Κέρδος διαφορισμού για διαθεσιμότητα 99.9% και 99.97% στα Ιωάννινα με συχνότητα 20 GHz και μήκη ζεύξεων 1 km.....	71
Σχήμα 4.20 Κατερχόμενη (2x1 SIMO) και ανερχόμενη (1x2 MISO) διάρθρωση δορυφορικού καναλιού σε ένα διπλό σύστημα διαφορισμού χώρου που λειτουργεί στη Ku ζώνη συχνοτήτων και άνω.....	74
Σχήμα 4.21 Γεωμετρική αναπαράσταση ενός υβριδικού δορυφορικού-επίγειου MIMO συστήματος.....	79
Σχήμα 4.22 Τεχνική διαφορισμού SIMO/MISO για Αθήνα για διάφορες κλιματικές συνθήκες, σε συχνότητα 20 GHz και μήκη ζεύξεων ίσα με 1 km.....	83

5 Κεφάλαιο: Μελλοντικές προοπτικές και ανοιχτά ερευνητικά θέματα για τα backhaul δίκτυα 5^{ης} γενιάς

Σχήμα 5.1 Ένα γενικό σχήμα υλοποίησης του RAN backhaul μέσω συνδέσεων xDSL.....	92
Σχήμα 5.2 (α) Λογικό γράφημα για το UTRAN backhaul (β) λογικό γράφημα για το E-UTRAN backhaul και (γ) σχήμα υλοποίησης για το LTE backhaul μέσω IP- VPN με δυνατότητα MSR.....	95

1 Κεφάλαιο: Τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς

1.1 Εισαγωγή

Η ασύρματη κίνηση δεδομένων αυξάνεται με ρυθμό άνω του 50% ετησίως ανά συνδρομητή και η τάση αυτή αναμένεται να επιταχυνθεί κατά την επόμενη δεκαετία με τη συνεχή χρήση βίντεο και την άνοδο του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT - Internet of Things). Για να αντιμετωπιστεί αυτή η ζήτηση, η ασύρματη βιομηχανία κινείται προς την πέμπτη γενιά (5G) της κυψελωτής τεχνολογίας που θα χρησιμοποιεί μικροκυματικές (mmWave) συχνότητες για να προσφέρει πρωτοφανές φάσμα και ρυθμούς δεδομένων πολλαπλών Gigabit ανά δευτερόλεπτο (Gbps) σε μια κινητή συσκευή. Οι κινητές συσκευές, όπως τα κινητά τηλέφωνα, αναφέρονται συνήθως ως εξοπλισμός χρήστη (UE - User Equipment). Είναι γνωστό ότι τα κανάλια εύρους ζώνης 1 GHz στα 28 ή 73 GHz θα μπορούσαν να προσφέρουν ρυθμούς δεδομένων αρκετών Gbps στον UE με μικρές φασικές στοιχειοκεραίες στην κινητή συσκευή [1], ενώ αποδείχθηκε ότι είναι δυνατοί μέγιστοι ρυθμοί των 15 Gbps με φασική στοιχειοκεραία 4×4 στον UE και απόσταση 200 m μεταξύ των σταθμών βάσης (BS - Base Station).

Η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών των ΗΠΑ (FCC - Federal Communications Commission) ενέκρινε το 2016 την κατανομή του φάσματος "Spectrum Frontiers" των 10.85 GHz του μικροκυματικού φάσματος για τις εξελίξεις του 5G.

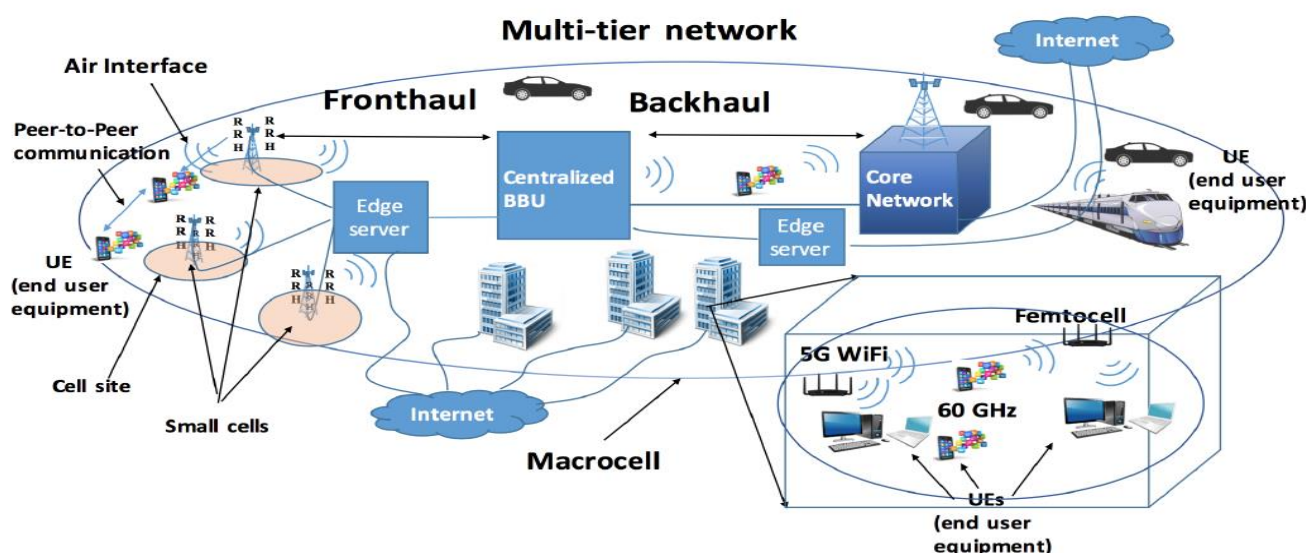
Το εύρος ζώνης των μικροκυματικών ασύρματων καναλιών 5G θα είναι πάνω από δέκα φορές μεγαλύτερο από τα σημερινά κανάλια κινητής τηλεφωνίας 4G Long-Term Evolution (LTE) των 20 MHz. Δεδομένου ότι τα μήκη κύματος συρρικνώνονται κατά μια τάξη μεγέθους σε σύγκριση με τις σημερινές μικροκυματικές συχνότητες 4G, η περίθλαση και η διείσδυση υλικών θα επιφέρουν μεγαλύτερη εξασθένηση, αυξάνοντας έτσι τη σημασία της διάδοσης με οπτική επαφή (LOS - Line Of Sight), της ανάκλασης και της σκέδασης. Τα ακριβή και αξιόπιστα μοντέλα διάδοσης είναι ζωτικής σημασίας για το σχεδιασμό νέων πρωτοκόλλων μικροκυματικής σηματοδότησης (π.χ. διεπαφές αέρα). Τα τελευταία χρόνια έχουν παρουσιαστεί μετρήσεις και μοντέλα για ένα ευρύ φάσμα σεναρίων από πολλές εταιρείες και ερευνητικές ομάδες. [2]

Η οργάνωση του εισαγωγικού αυτού κεφαλαίου εκτυλίσσεται ως εξής: Η ενότητα 1.2 συνοψίζει τις βασικές έννοιες του 5G συστήματος των αναδυόμενων δικτύων μικροκυματικής ασύρματης επικοινωνίας και η ενότητα 1.3 παρουσιάζει την

πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική των δικτύων 5G. Η ενότητα 1.4 περιγράφει τη ραδιοεπαφή, η ενότητα 1.5 αναλύει την ζώνη του μη αδειοδοτημένου WiFi και τέλος στην ενότητα 1.6 περιγράφονται συνοπτικά τα δίκτυα οχημάτων και οι ευφυείς μεταφορές.

1.2 Εισαγωγή στις έννοιες του δικτύου 5G και στις διεπαφές αέρα

Το δίκτυο 5G υπόσχεται μεγάλη ευελιξία για την υποστήριξη πληθώρας συσκευών του πρωτοκόλλου Διαδικτύου (IP), αρχιτεκτονικών μικρών κυψελών και πυκνών περιοχών κάλυψης. Οι εφαρμογές που οραματίζονται για το 5G περιλαμβάνουν το από ίντερντ, την επικοινωνία οχήματος με όχημα, την επικοινωνία οχήματος με υποδομή, καθώς και την peer-to-peer (ομότιμη) επικοινωνία και την επικοινωνία μηχανής με μηχανή, οι οποίες θα απαιτούν εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση δικτύου και ζήτηση κατά περίπτωση για μεγάλες εκρήξεις δεδομένων σε μικροσκοπικές χρονικές εποχές. Οι τρέχουσες καθυστερήσεις κυκλικής διαδρομής του 4G LTE και του WiFi είναι περίπου 20-60 ms αλλά το 5G θα προσφέρει καθυστερήσεις κυκλικής διαδρομής της τάξης του 1 ms. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1, το σημερινό 4G κυψελωτό δίκτυο εξελίσσεται για να υποστηρίξει το 5G, όπου η αποφόρτιση του WiFi, οι μικρές κυψέλες και η διανομή δεδομένων ευρείας ζώνης θα βασίζονται σε διακομιστές στα άκρα του δικτύου (edge servers) για να κάνουν δυνατές νέες περιπτώσεις χρήσης με χαμηλότερη καθυστέρηση.



Σχήμα 1.1: Η πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική του 5G [1].

1.2.1 Οι έννοιες των *backhaul* και *fronthaul*

Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται πώς η *backhaul* ζεύξη ή *backhaul* συνδέει τη σταθερή κυψελωτή υποδομή (π.χ. BS – Base Station) με τον κορμό του τηλεφωνικού δικτύου και το διαδίκτυο. Επίσης, η *backhaul* μεταφέρει την κυκλοφορία δεδομένων μεταξύ του τοπικού υποδικτύου (π.χ. τις συνδέσεις μεταξύ UE και BSs) και του δικτύου κορμού (π.χ. το διαδίκτυο και το γραφείο μεταγωγής κινητής τηλεφωνίας (MSO - Mobile Switching Telephone Office)). Το 4G και η WiFi *backhaul* και όχι η διεπαφή αέρα, αποτελούν συχνά πηγές συμφόρησης της κυκλοφορίας στα σύγχρονα δίκτυα, δεδομένου ότι οι *backhaul* ζεύξεις που παρέχονται από βασιζόμενες σε πακέτα Ethernet-over-Fiber ζεύξεις, παρέχουν συνήθως περίπου 1 Gbps, το οποίο μπορεί εύκολα να καταναλωθεί από πολλούς UEs. Σε μια τυπική τοποθεσία μακροκυψέλης, μια μονάδα βασικής ζώνης (BBU - BaseBand Unit) βρίσκεται σε ένα οριοθετημένο χώρο στη βάση μιας απομακρυσμένης τοποθεσίας κυψέλης και είναι άμεσα συνδεδεμένη με την *backhaul*. Η BBU επεξεργάζεται και διαμορφώνει τα δεδομένα πακέτων IP από το δίκτυο κορμού σε ψηφιακά σήματα βασικής ζώνης που μεταδίδονται σε απομακρυσμένες ραδιοκεφαλές (RRHs - Remote Radio Heads). Το ψηφιακό σήμα βασικής ζώνης κινείται από την BBU σε ένα RRH μέσω μιας κοινής δημόσιας ραδιοδιεπαφής (CPRI - Common Public Radio Interface) μέσω μιας ψηφιακής radio-over-fiber (D-RoF - Digital Radio-over-Fiber) ζεύξης, επίσης γνωστής ως *fronthaul* ζεύξη ή *fronthaul*. Η RRH μετατρέπει το ψηφιακό σήμα σε αναλογικό για μετάδοση μέσω του αέρα στη φέρουσα συχνότητα συνδέοντας ενισχυτές και κεραίες για τη μετάδοση της καθοδικής ζεύξης από τον πύργο κυψέλης. Το RRH μετατρέπει επίσης το λαμβανόμενο σήμα ανοδικής ζεύξης ραδιοσυχνότητας (RF - RadioFrequency) από τους UEs σε ψηφιακό σήμα βασικής ζώνης το οποίο κινείται από την RRH στην BBU μέσω της ίδιας σύνδεσης CPRI και D-RoF στη βάση του πύργου κυψέλης. Στη συνέχεια, η BBU επεξεργάζεται και πακετάρει το ψηφιακό σήμα βασικής ζώνης από την RRH και το αποστέλλει μέσω μιας *backhaul* ζεύξης στο δίκτυο κορμού. Συνοπτικά, η *fronthaul* ζεύξη είναι η σύνδεση μεταξύ της RRH και της BBU και προς τις δύο κατευθύνσεις και η *backhaul* ζεύξη είναι η σύνδεση μεταξύ της BBU και του δικτύου κορμού και προς τις δύο κατευθύνσεις.

Οι σύγχρονες κυψελωτές αρχιτεκτονικές υποστηρίζουν μια πιο ευέλικτη ανάπτυξη των ραδιοπόρων που μπορούν να κατανεμηθούν χρησιμοποιώντας μια τεχνική δικτύου ραδιοπρόσβασης νέφους, όπου ένας BS χωρίζεται σε δύο μέρη, ένα μέρος όπου οι RRHs βρίσκονται σε απομακρυσμένες θέσεις κυψελών και στο άλλο μέρος, μια

κεντρική BBU βρίσκεται σε απόσταση έως και δεκάδων χιλιομέτρων (βλ. Σχήμα 1.1). Το CPRI χρησιμοποιείται για fronthaul και διασυνδέει την κεντρική BBU και τις πολλαπλές RRHs μέσω D-RoF. Το ασύρματο μικροκυματικό backhaul και fronthaul θα προσφέρει ρυθμούς δεδομένων και εύρος ζώνης που μοιάζει με τις οπτικές ίνες στην υποδομή χωρίς τα έξοδα ανάπτυξης ενσύρματων δικτύων backhaul ή D-RoF μεγάλης εμβέλειας [3]

1.2.2 Η έννοια της μικρής κυψέλης

Ένας αποτελεσματικός τρόπος αύξησης της φασματικής απόδοσης της περιοχής είναι η συρρίκνωση του μεγέθους των κυψελών, όπου ο μειωμένος αριθμός χρηστών ανά κυψέλη, που προκαλείται από τη συρρίκνωση των κυψελών, παρέχει περισσότερο φάσμα σε κάθε χρήστη. Η συνολική χωρητικότητα του δικτύου αυξάνεται κατά πολύ με τη συρρίκνωση των κυψελών και την επαναχρησιμοποίηση του φάσματος, ενώ οι μελλοντικοί BSs και οι άμεσες συνδέσεις συσκευής προς συσκευή μεταξύ των UEs προβλέπεται να προσφέρουν στο 5G μεγαλύτερη χωρητικότητα ανά χρήστη [4]. Οι femto-κυψέλες που μπορούν να αλλάζουν δυναμικά τη σύνδεσή τους με το δίκτυο κορμού του παρόχου θα αντιμετωπίσουν προκλήσεις, όπως η διαχείριση των παρεμβολών RF και η διατήρηση του χρονοπρογραμματισμού και του συγχρονισμού, και για αυτό αναπτύχθηκαν διάφορες στρατηγικές αποφυγής παρεμβολών και προσαρμοστικού ελέγχου ισχύος. Η ανάλυση της ασύρματης κίνησης backhaul στα 5.8 GHz, 28 GHz και 60 GHz σε δύο τυπικές αρχιτεκτονικές δικτύων έδειξε ότι η φασματική απόδοση και η ενεργειακή αποδοτικότητα αυξάνονται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των μικρών κυψελών.

1.3 Πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική δικτύων 5G

Το σχέδιο δράσης για τα δίκτυα 5G θα αξιοποιήσει μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική κυψελών 4G μεγαλύτερης κάλυψης με ένα υποκείμενο δίκτυο πυκνότερα τοποθετημένων BS 5G, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Μια αρχιτεκτονική πολλαπλών επιπέδων επιτρέπει στους χρήστες σε διαφορετικές βαθμίδες να έχουν διαφορετικές προτεραιότητες για την πρόσβαση σε κανάλια και διαφορετικά είδη συνδέσεων (π.χ. μακροκυψέλες, μικρές κυψέλες και συνδέσεις μεταξύ συσκευών). Έτσι υποστηρίζονται υψηλότεροι ρυθμοί δεδομένων, χαμηλότερες καθυστερήσεις, βελτιστοποιημένη κατανάλωση ενέργειας και διαχείριση παρεμβολών με τη χρήση κριτηρίων λαμβάνοντας

υπόψη τους πόρους για τη συσχέτιση των BSs και τα φορτία κίνησης που κατανέμονται στο χρόνο και στο χώρο. Οι εφαρμογές 5G θα απαιτήσουν επίσης νέες αρχιτεκτονικές δικτύων που θα υποστηρίζουν τη σύγκλιση διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών (π.χ. WiFi, LTE, μικροκύματα, IoT χαμηλής ισχύος), οι οποίες θα αλληλοεπιδρούν με ευέλικτο και απρόσκοπτο τρόπο χρησιμοποιώντας τις αρχές δικτύωσης ορισμένης από λογισμικό (SDN - Software Defined Networking) και εικονοποίησης δικτύου (Network Virtualization) [1].

1.4 Διεπαφή του αέρα

Ο σχεδιασμός νέων διεπαφών αέρα φυσικού επιπέδου αποτελεί ενεργό πεδίο της έρευνας για τα δίκτυα 5G. Θα δημιουργηθούν σχήματα σηματοδοσίας που παρέχουν χαμηλότερη καθυστέρηση, γρήγορο σχηματισμό δέσμης (beamforming) και συγχρονισμό, με πολύ μικρότερες χρονοθυρίδες και καλύτερη φασματική απόδοση από την ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM - Orthogonal Frequency Division Model) που χρησιμοποιείται στο 4G. Επίσης, χρησιμοποιούνται γραμμικά σχήματα διαμόρφωσης, όπως η διαμόρφωση φίλτρων πολλαπλών φερόντων (FBMC - Filter Bank MultiCarrier), στην οποία οι υπο-φέρουσες περνούν μέσα από φίλτρα που καταστέλλουν τις δευτερεύουσες παρεμβολές (πλευρικοί λοβοί). Η γενικευμένη πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (GFDM - General Frequency Division Multiplexing) σε σύγκριση με την OFDM που χρησιμοποιείται στο σημερινό 4G LTE (η οποία έχει ένα κυκλικό πρόθεμα ανά σύμβολο και υψηλές εκπομπές εκτός ζώνης) βελτιώνει τη φασματική απόδοση και έχει περίπου 15 dB ασθενέστερες εκπομπές εκτός ζώνης. Ακόμα έχουμε τη διαμόρφωση ορθογώνιου σχήματος χώρου - χρόνου - συχνότητας (OTFS - Orthogonal Time Frequency Space) που μεταδίδει τα σήματα στο επίπεδο χρόνου-συχνότητας, λόγω του ανώτερου διαφορισμού και της μεγαλύτερης ευελιξίας στο σχεδιασμό των δοκιμών. Η ανατροφοδότηση και η διαχείριση της κατάστασης του καναλιού για την υποστήριξη της κατευθυντικής αναζήτησης/καθοδήγησης δέσμης θα είναι επίσης ζωτικής σημασίας.

1.5 Μη αδειοδοτημένο WiFi για δίκτυα 5G

Το μικροκυματικό WiFi για τις μη αδειοδοτημένες ζώνες 57-64 GHz αναπτύσσεται εδώ και σχεδόν μια δεκαετία, με τη διαδικασία τυποποίησης WirelessHD και IEEE 802.11ad να ξεκινά το 2007 και το 2009 αντίστοιχα. Οι συσκευές IEEE 802.11ad, οι οποίες μπορούν να επιτύχουν ρυθμούς κατά μέγιστο 7 Gbps και τα προϊόντα

WirelessHD, τα οποία φτάνουν τα 4 Gbps με θεωρητικούς ρυθμούς δεδομένων έως και 25 Gbps είναι ήδη διαθέσιμα. Βασισμένα στην ιστορία του προτύπου WiFi IEEE 802.11n, δύο νεότερα πρότυπα, τα IEEE 802.11ac και 802.11ad, αποτελούν τροποποιήσεις που βελτιώνουν την απόδοση ώστε να φτάσει το 1 Gbps στη ζώνη των 5 GHz και έως και 7 Gbps στη ζώνη των 60 GHz, αντίστοιχα. Μια επισκόπηση των τροποποιήσεων του IEEE Gigabit για τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN - Wireless Local Access Network) (IEEE 802.11ac και 802.11ad) δείχνει την καταλληλότητα αυτών των δύο προτύπων για επικοινωνίες πολλαπλών gigabit. Για το πρότυπο 802.11ad τα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν γρήγορη μεταφορά περιόδου (session transfer) για απρόσκοπτη πτώση του ρυθμού δεδομένων (και αύξηση του ρυθμού) μεταξύ των φυσικών στρωμάτων (PHY - Physical layer) των 60 GHz και των 2,4/5 GHz και βελτιώσεις στον έλεγχο μέσου πρόσβασης (MAC - Medium Access Control) για κατευθυντικές κεραίες, διαμόρφωση δέσμης, backhaul, αναμεταδότες και τεχνικές χωρικής επαναχρησιμοποίησης. Για τις βελτιώσεις του PHY, η διαμόρφωση δέσμης με χρήση κατευθυντικών κεραιών ή στοιχειοκεραιών χρησιμοποιείται για να ξεπεραστούν οι αυξημένες απώλειες στα 60 GHz. Το πρότυπο IEEE 802.11ay είναι ένα εν εξελίξει έργο με στόχο την υποστήριξη μέγιστης απόδοσης τουλάχιστον 20 Gbps στην μη αδειοδοτημένη ζώνη των 60 GHz. Τέλος είναι βέβαιο ότι θα προκύψουν νεότερα πρότυπα WiFi για την εκμετάλλευση του νέου μη αδειοδοτημένου φάσματος 64-71 GHz [5].

1.6 Δίκτυα Οχημάτων

Οι επικοινωνίες μεταξύ οχημάτων (V2V - Vehicle-to-Vehicle) αποτελούν σημαντικό εργαλείο για την αύξηση της οδικής ασφάλειας και τη μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Επί του παρόντος, το πιο διερευνώμενο σύστημα είναι το πρότυπο IEEE 802.11p το οποίο λειτουργεί στη ζώνη των 5.9 GHz για την επικοινωνία V2V και την επικοινωνία οχήματος-υποδομής (V2I - Vehicle-to-Infrastructure) που είναι γνωστές ως αποκλειστικές επικοινωνίες μικρού εύρους (DSRC - Dedicated Short Range Communications). Οι μικροκυματικές ζώνες (π.χ. 24 GHz και 77 GHz) είναι ελκυστικές για τις επικοινωνίες V2V και V2I, (π.χ. αυτοκίνητα, σιδηροδρομικά συστήματα υψηλής ταχύτητας και μετρό), δεδομένου ότι τα συνδεδεμένα οχήματα θα χρειάζονται ρυθμούς μετάδοσης της τάξεως των Gbps, οι οποίοι δεν μπορούν να επιτευχθούν στα εύρη ζώνης καναλιού 10 MHz στα 5.9 GHz στο σημερινό 4G. Οι περιορισμοί της συνδεσιμότητας V2V περιλαμβάνουν τη δυσκολία επίτευξης πραγματικής χωρικής

συνοχής για τη διατήρηση της σύνδεσης δεδομένων για οχήματα υψηλής ταχύτητας. Εκτιμήσεις έχουν δείξει ότι οι κατευθυντικές κεραίες στενής δέσμης είναι πιο κατάλληλες για συστήματα που βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.11p και διάφορα συστήματα που αποσκοπούν στη χρήση προσαρμοστικών κεραιών για ταχέως κινούμενες επικοινωνίες V2V.

2 Κεφάλαιο: Η εξέλιξη του δικτύου ραδιοπρόσβασης Backhaul

2.1 Εισαγωγή

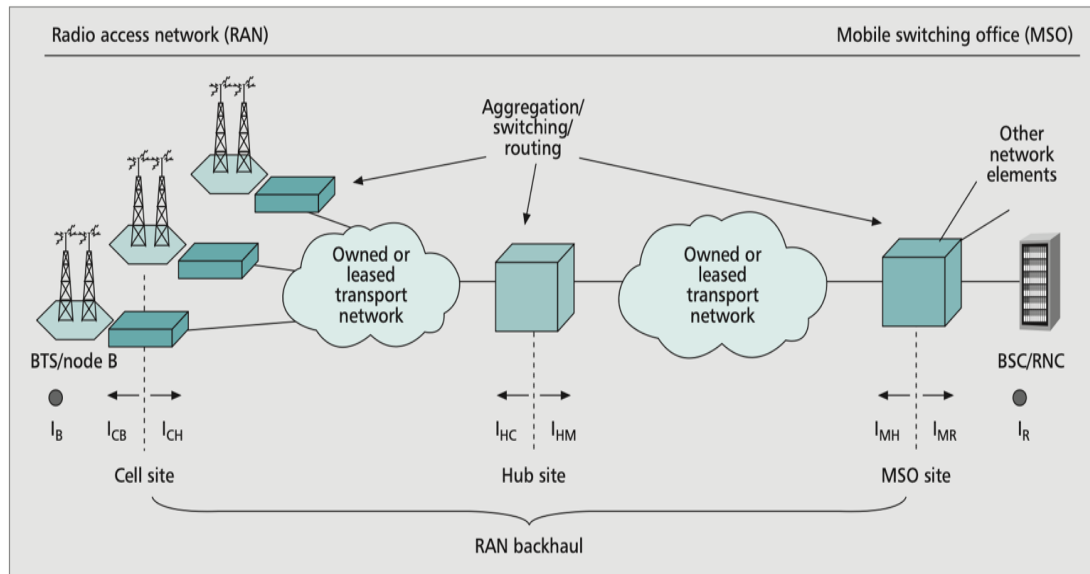
Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά παρουσιάζεται η γενική αρχιτεκτονική αναφοράς backhaul για τις τεχνολογίες RAN 2G και 3G, ακολουθούμενη από μία σύντομη περιγραφή του σχεδιασμού του, που αποτελεί πλέον σημαντικό μέρος στην διαδικασία σχεδιασμού νέων υπηρεσιών. Δεδομένου ότι η χωρητικότητα και η πολυπλοκότητα των backhaul ζεύξεων υπαγορεύουν το κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας του δικτύου, οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας δίνουν πολύ μεγαλύτερη έμφαση στη βελτιστοποίηση της RAN backhaul. Για το λόγο αυτό παρέχεται μια σύντομη επισκόπηση της εξέλιξης των τεχνολογιών backhaul, από τους παλαιούς μεταγωγείς διασύνδεσης TDM (DCS - Digital Cross-connect Switches), έως τους δρομολογητές πολλαπλών υπηρεσιών (MSR - Multi-Service Router) με δυνατότητα MPLS (Multiprotocol Label Switching).

Στην συνέχεια επεκτείνουμε την αρχιτεκτονική αναφοράς για το σχεδιασμό της LTE backhaul. Όπως είναι αναμενόμενο με κάθε νέα γενιά τεχνολογίας ραδιοπρόσβασης (RAT - Radio Access Technology), το LTE εισήγαγε αρκετές απαιτήσεις για το σχεδιασμό του δικτύου backhaul, οι οποίες και αναλύονται.

2.2 Βασική Αρχιτεκτονική στην Backhaul ζεύξη

Όλες οι μορφές τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης απαιτούν ενσύρματες ή ασύρματες ζεύξεις για τη μεταφορά της κίνησης από τις θέσεις ραδιοεπικοινωνίας στις θέσεις ελέγχου ή μεταγωγής. Αυτές οι συνδέσεις μεταφοράς αποτελούν συλλογικά το δίκτυο ραδιοπρόσβασης backhaul (RAN - Radio Access Network).

Μία γενική αναπαράσταση ενός τυπικού τμήματος RAN backhaul περιλαμβάνει τρία κύρια σημεία ενδιαφέροντος που είναι οι τοποθεσίες κυψέλης, κόμβου και γραφείου κινητής μεταγωγής (MSO - Mobile Switching Office). Σε αυτές τις τοποθεσίες, εκτελούνται λειτουργίες συγκέντρωσης, μεταγωγής και δρομολόγησης για τη βέλτιστη μεταφορά της κίνησης μεταξύ του δικτύου ραδιοπρόσβασης και του δικτύου κορμού. Παρόλο που οι τεχνολογίες που εμπλέκονται στην εκτέλεση των απαραίτητων λειτουργιών σε αυτά τα σημεία ενδιαφέροντος εξελίσσονται με την πάροδο του χρόνου, η αρχιτεκτονική του δικτύου παραμένει σχετικά σταθερή όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Γενική αρχιτεκτονική αναφοράς RAN backhaul [6].

Αναλυτικότερα σχετικά με το Σχήμα 2.1, ένα συγκεκριμένο σχήμα υλοποίησης της RAN backhaul μπορεί να οριστεί με βάση τις διαθέσιμες διεπαφές στις συσκευές της κυψέλης, του κόμβου και της θέσης του MSO, οι οποίες συμβολίζονται ως (I_{CB}, I_{CH}) , (I_{HC}, I_{HM}) , (I_{MH}, I_{MR}) , αντίστοιχα. Η επιλογή των διεπαφών I_{xx} στις περισσότερες περιπτώσεις υπαγορεύεται από την επιλογή του δικτύου μεταφοράς, π.χ. μεταγωγής κυκλώματος ή μεταγωγής πακέτου. Επιπλέον, η επεξεργασία που διαμορφώνεται μεταξύ των διεπαφών εισόδου και εξόδου αυτών των συσκευών μπορεί να εξαρτάται από το αν το δίκτυο μεταφοράς είναι ιδιόκτητο ή μισθωμένο.

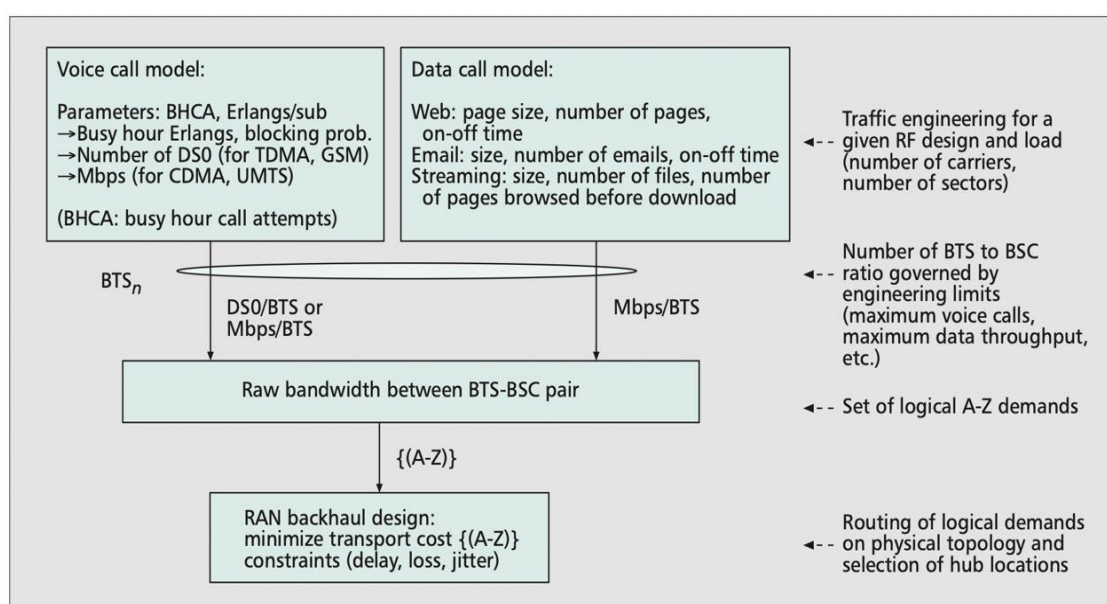
Σημαντικό σημείο κατά το σχεδιασμό ενός δικτύου RAN backhaul είναι η εκτίμηση της απαιτούμενης χωρητικότητας στις διάφορες διεπαφές κατά μήκος της αρχιτεκτονικής αναφοράς.

2.3 Διαδικασία Σχεδιασμού της RAN Backhaul

Συνήθως, η διαδικασία σχεδιασμού της RAN backhaul συνδέεται στενά με τη διαδικασία μηχανικής της κίνησης. Η μηχανική της κίνησης στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των συνδρομητών, που αφορά τον αριθμό των φωνητικών κλήσεων ανά χρήστη, τη διάρκειά τους και τη χρήση δεδομένων σε αριθμό bits ανά τύπο εφαρμογής, για τη δημιουργία εκτιμήσεων της μέγιστης και της μέσης κίνησης στο δίκτυο πρόσβασης και στο δίκτυο κορμού. Εκτός από τη συμπεριφορά του συνδρομητή και της χρήσης των εφαρμογών, η μηχανική της κίνησης λαμβάνει επίσης υπόψη το σχεδιασμό ραδιοσυχνότητας (RF - Radio

Frequency) και τα όρια χωρητικότητας επεξεργασίας διαφόρων στοιχείων του δικτύου, όπως ο σταθμός βάσης πομποδέκτη (BTS - Base Transceiver Station) και ο ελεγκτής σταθμού βάσης (BSC - Base Station Controller).

Στο τέλος της διαδικασίας μηχανικής της κίνησης εκτιμάται μια συλλογή λογικών απαιτήσεων μεταξύ μιας ομάδας BTS και BSC. Στη συνέχεια, η διαδικασία σχεδιασμού της RAN backhaul χρησιμοποιεί αυτό το σύνολο λογικών απαιτήσεων για την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς, διατηρώντας παράλληλα τους απαιτούμενους περιορισμούς QoS (Quality of Service), όπως η καθυστέρηση, η απώλεια πακέτων και η διακύμανση (jitter) των υποστηριζόμενων εφαρμογών. Η ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς είναι συνήθως ένα κοινό πρόβλημα βελτιστοποίησης, όπου το κόστος της τοπικής μεταγωγής αντισταθμίζεται με το κόστος μιας σύνδεσης μεταφοράς για τη μεταφορά της κίνησης σε μια πιο βέλτιστη θέση μεταγωγής. Ο σχεδιασμός μίας RAN backhaul και η σχετική διαδικασία μηχανικής της κίνησης απεικονίζονται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Διαδικασία σχεδιασμού RF και μηχανικής της κίνησης που παρέχει τις απαιτούμενες εισροές για το σχεδιασμό RAN backhaul [6].

Στο Σχήμα 2.2, η διαδικασία μηχανικής της κίνησης αναλύεται συμβατικά σε δύο ξεχωριστές κατηγορίες που αφορούν τις απαιτήσεις πρόσβασης φωνής και δεδομένων. Με την εισαγωγή του VoIP (Voice over IP), η φωνή θα γίνει τελικά άλλη μία εφαρμογή στο σύνολο των σημερινών εφαρμογών δεδομένων

2.4 Εξέλιξη Τεχνολογιών RAN Backhaul

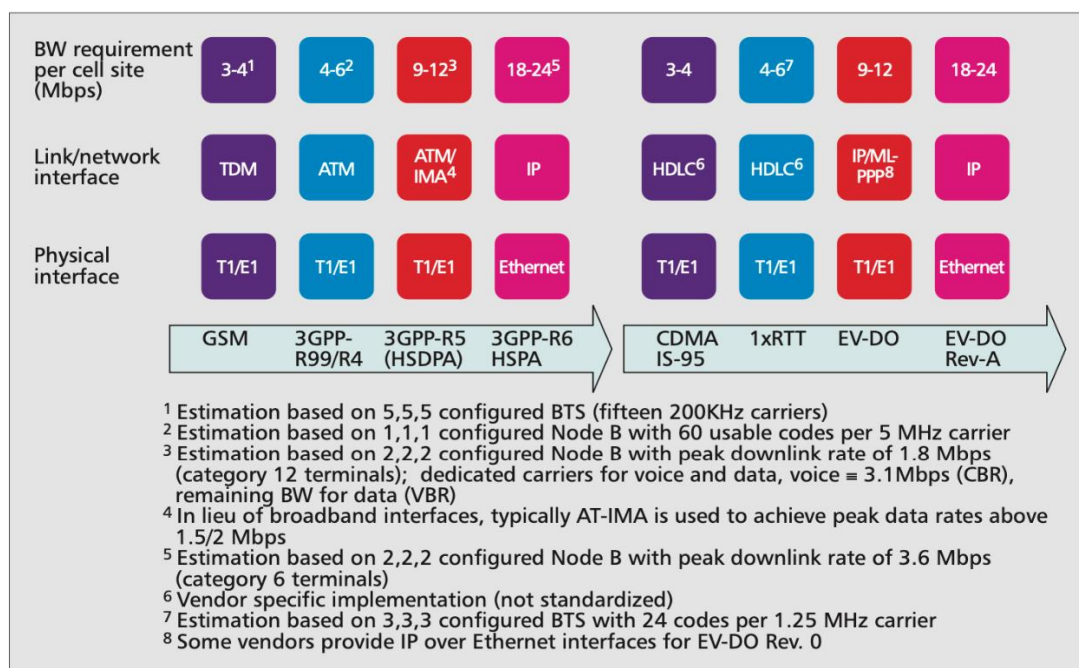
Παραδοσιακά οι απαιτήσεις σχεδιασμού των δικτύων RAN backhaul καθοδηγούνται από την κίνηση της φωνής. Ωστόσο, καθώς οι συσκευές και οι εφαρμογές των τελικών χρηστών εξελίσσονται, η έμφαση δίνεται πλέον στην υποστήριξη υπηρεσιών κινητών δεδομένων. Συγκεκριμένα, τα δίκτυα backhaul προσαρμόζονται για να ικανοποιήσουν τις αυστηρές απαιτήσεις εύρους ζώνης της πρόσβασης πακέτων υψηλής ταχύτητας (HSPA - High Speed Packet Access) και των βελτιώσεων 1x evolution-data optimized (EV-DO) στα δίκτυα WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) και CDMA2000. Αυτές οι βελτιώσεις, με τη δυνατότητα αύξησης των μέγιστων ρυθμών δεδομένων κατά τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους σε σύγκριση με τους υφιστάμενους ρυθμούς, μπορούν να αυξήσουν σημαντικά το κόστος μεταφοράς, εάν τα δίκτυα backhaul σχεδιάζονται μέσω της συνήθους προσέγγισης TDM/μεταγωγής κυκλώματος. Ως εκ τούτου, οι πάροχοι αναζητούν τρόπους μείωσης αυτού του κόστους με την εισαγωγή τεχνολογιών συγκέντρωσης ή/και μεταγωγής σε επίπεδο πακέτων σε διάφορα σημεία μεταξύ του RAN και των δικτύων κορμού. Η εξέλιξη των συσκευών των κυψελών, των κόμβων και των συσκευών MSO, ώστε να ανταποκρίνονται στην αναφερόμενη μετατόπιση των απαιτήσεων backhaul, παρουσιάζεται ακολούθως.

2.4.1 Συσκευή Τοποθεσίας Κυψέλης (Cell site device)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, μια συσκευή κυψέλης συγκεντρώνει την κίνηση από ένα ή περισσότερα BTS/κόμβους Bs σε μια δεδομένη θέση. Συνήθως για τα δίκτυα 2G, οι συσκευές κυψέλης δεν θεωρούνταν απαραίτητες, καθώς η κίνηση που προερχόταν από κάθε ένα από τα BTS ήταν της τάξης μερικών Mbps κι όχι αρκετή για να δικαιολογήσει μια εξειδικευμένη συσκευή. Οι περιπτώσεις στις οποίες υπήρχαν τέτοιες συσκευές στην κυψέλη δικαιολογούνταν κυρίως για λειτουργικούς λόγους, όπως η απομόνωση σφαλμάτων, η απομακρυσμένη αντιμετώπιση προβλημάτων κ.λπ. Ωστόσο, καθώς η απαίτηση κυκλοφορίας από κάθε κόμβο B αναμένεται να αυξηθεί αρκετά, οι λειτουργίες διευθέτησης της κίνησης και βελτιστοποίησης του ωφέλιμου φορτίου κρίνονται απαραίτητες, καθιστώντας αναγκαία μια ειδική συσκευή για την τοποθεσία κυψέλης. Η απαίτηση για τη διαχείριση ζεύξεων μεταφοράς ραδιοτεχνολογιών πολλών γενεών επιταχύνει περαιτέρω αυτή τη ζήτηση.

Καθώς η συσκευή της θέσης κυψέλης διασυνδέεται άμεσα με το BTS/κόμβο B, η εξέλιξή της συνδέεται στενά με την εξέλιξη των διαθέσιμων διεπαφών BTS/κόμβου

Β. Ως εκ τούτου, διερευνώνται οι τάσεις των διαθέσιμων διεπαφών σε BTS/κόμβους Bs για να αιτιολογηθεί η αντίστοιχη εξέλιξη των συσκευών κυψέλης. Οι σχετικές πτυχές της εξέλιξης των BTS/Node Bs, όπως η φυσική διεπαφή, η διεπαφή επιπέδου σύνδεσης/δικτύου και η απαίτηση εύρους ζώνης για ένα τυπικό σενάριο ανάπτυξης, παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Εξέλιξη των διεπαφών BTS/κόμβου B [6].

Το Σχήμα 2.3 επιχειρεί να αποτυπώσει δύο σημαντικές τάσεις εξέλιξης μεταξύ των διεπαφών, οι οποίες ξεκινούν από το GSM και το IS-95 (CDMA) ως βασικές τεχνολογίες 2G. Οι προσπάθειες τυποποίησης για την εξέλιξη του GSM στο πλαίσιο του 3GPP επέβαλαν το ATM (Asynchronous Transfer Mode) ως το πρωτόκολλο του στρώματος ζεύξης ανάμεσα στον κόμβο B και τον ελεγκτή ραδιοδικτύου (RNC -Radio Network Controller), αφού η μεταφορά IP δεν μπορούσε να ανταποκριθεί στην αυστηρή αξιοπιστία και την QoS που σχετίζονταν με το προηγούμενο επίπεδο σύνδεσης TDM που ήταν διαθέσιμο στα δίκτυα GSM. Ωστόσο, καθώς το IP εξελίχθηκε ως η καλύτερη δυνατή προσπάθεια, η μεταφορά χωρίς σύνδεση, σε μεταφορά με επίγνωση της QoS και με έλεγχο της κυκλοφορίας, τα πρόσφατα πρότυπα 3GPP (R6 και μετά) υπαγορεύουν το IP ως την απαιτούμενη τεχνολογία μεταφοράς για την κλιμάκωση των δικτύων ραδιοπρόσβασης.

Από την άλλη πλευρά η τυποποίηση IS-95 (CDMA) υπό την ένωση βιομηχανίας τηλεπικοινωνιών (TIA - Telecommunications Industry Association) δεν έχει καθορίσει

μια συγκεκριμένη τεχνολογία επιπέδου ζεύξης που θα χρησιμοποιείται μεταξύ BTS και BSC. Οι συνήθεις επιλογές εφαρμογής είναι ο έλεγχος σύνδεσης δεδομένων υψηλού επιπέδου (HDLC - High-level Data Link Control) ή το πρωτόκολλο σημείου προς σημείο (PPP - Point-to-Point Protocol). Εξαιτίας αυτής της μη TDM μεροληψίας, τα ακόλουθα CDMA2000 πρότυπα υπό το 3GPP2 σύγκλιναν γρήγορα στη μεταφορά βάσει IP, παρακάμπτοντας το στρώμα ATM συνολικά σε αυτή την εξέλιξη.

Οι φυσικές διεπαφές δεν καθορίζονται από τα πρότυπα αλλά παραμένουν ως επιλογή υλοποίησης. Λόγω της ευρείας διαθεσιμότητας μεταφοράς με βάση το T1/E1 στο πρώτο μίλι των δικτύων πρόσβασης, οι πιο συνηθισμένες φυσικές διεπαφές στα BTS/Node B βασίζονται στο T1/E1. Ωστόσο, καθώς τα δίκτυα πρόσβασης αναβαθμίζονται παντού για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις υψηλότερου ρυθμού δεδομένων για σταθερή ευρυζωνικότητα, η μεταφορά με βάση το Ethernet αναδεικνύεται σε τεχνολογία επιλογής ακόμη και μεταξύ των προμηθευτών ραδιοσυχνοτήτων. Ως εκ τούτου, η κοινή αντίληψη είναι ότι μόλις οι μέγιστοι ρυθμοί δεδομένων ξεπεράσουν κατά πολύ την χωρητικότητα του φορέα T1/E1, οι διεπαφές Ethernet θα γίνουν ευρέως διαθέσιμες.

Δύο είναι οι τάσεις εξέλιξης που μπορούν εύκολα να εξαχθούν από την αναπαράσταση του Σχήματος 2.3:

ET1 - Φυσικές διεπαφές που εξελίσσονται από T1/E1 σε Ethernet.

ET2 - Διεπαφές επιπέδου δικτύου που συγκλίνουν σε IP.

Αυτές οι δύο τάσεις εξέλιξης σχετίζονται με δύο κοινά χρησιμοποιούμενες πρακτικές για την επιλογή της κατάλληλης συσκευής τοποθεσίας κινητής τηλεφωνίας. Η πρώτη προσέγγιση είναι η παροχή ελάχιστων λειτουργιών στη συσκευή της κυψέλης, η οποία συμπληρώνεται με τις πλούσιες σε χαρακτηριστικά συσκευές μπροστά από το BSC/RNC. Σε αυτή την περίπτωση, η συσκευή κυψέλης στην ουσία απεικονίζει τη φυσική διεπαφή του BTS στην τεχνολογία μεταφοράς που είναι διαθέσιμη στην θέση κυψέλης. Η δεύτερη προσέγγιση είναι η εκτέλεση πρόσθετων λειτουργιών επεξεργασίας ωφέλιμου φορτίου, προετοιμασίας και μεταγωγής στην τοποθεσία κυψέλης. Στην περίπτωση αυτή, η συσκευή κυψέλης πρέπει να τερματίσει το επίπεδο σύνδεσης/δικτύου για να επεξεργαστεί το ωφέλιμο φορτίο πριν από τη μεταφορά του στο BSC/RNC.

2.4.2 Συσσκευή Τοποθεσίας Κόμβου (Hub Site Device)

Ο κύριος σκοπός μιας συσκευής κόμβου είναι να συγκεντρώνει την κίνηση από πολλές κυψέλες, όπως άλλωστε φαίνεται και στην γενική αρχιτεκτονική RAN Backhaul του Σχήματος 2.1. Οι εισερχόμενες ζεύξεις σε μια συσκευή κόμβου προέρχονται είτε από τις συσχετιζόμενες συσκευές κυψελών είτε από απευθείας ενσύρματες ή ασύρματες ζεύξεις σημείου προς σημείο από BTS/κόμβους Bs. Αυτό το ενδιαμέσο επίπεδο συνάθροισης συνήθως μειώνει το συνολικό κόστος μεταφοράς συνδυάζοντας ένα μεγάλο αριθμό μερικώς γεμάτων εισερχόμενων ζεύξεων σε λίγες αρκετά γεμάτες ανερχόμενες ζεύξεις προς τα MSOs.

Σύμφωνα με τους τρόπους ανάπτυξης των συσκευών κυψέλης, οι συσκευές κόμβου μπορούν επίσης να αναπτυχθούν για την επεξεργασία διεπαφών φυσικού επιπέδου ή επιπέδου ζεύξης/δικτύου. Η τρέχουσα εξέλιξη των συσκευών κόμβου μοιάζει πολύ με την εξέλιξη που περιεγράφηκε για τις συσκευές κυψέλης στην προηγούμενη υποενότητα. Ωστόσο, οι συσκευές κυψέλης και κόμβου διαφέρουν ως προς την απαιτούμενη ικανότητα επεξεργασίας και το επιτευχθέν επίπεδο βελτιστοποίησης. Δεδομένου ότι μια συσκευή κόμβου συνήθως διαχειρίζεται κίνηση από πολλαπλές κυψέλες, οι απαιτήσεις χωρητικότητας και επεξεργασίας είναι πολύ υψηλότερες από τη συσκευή κυψέλης. Επίσης, η συσκευή κόμβου λειτουργεί για κίνηση που προέρχεται από μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή, η οποία συνήθως αποτελείται από ποικίλο πληθυσμό συνδρομητών. Ως εκ τούτου, τα κέρδη στατιστικής πολυπλεξίας είναι πολύ υψηλότερα από αυτά που επιτυγχάνονται μέσω των μεμονωμένων συσκευών στις θέσεις κυψέλης.

Για τους λόγους που αναφέρθηκαν, ορισμένοι πάροχοι μπορεί να προτιμούν να αναπτύσσουν συσκευές κόμβου αυστηρά για λόγους βελτιστοποίησης και συσκευές κυψέλης για την αυτοματοποίηση διαφόρων διαδικασιών λειτουργίας και συντήρησης.

2.4.3 Συσσκευή Τοποθεσίας Γραφείου Κινητής Μεταφοράς (MSO site device)

Οι ζεύξεις μεταφοράς backhaul που προέρχονται από BTS/κόμβους Bs καταλήγουν σε ένα ή περισσότερους BSC/RNC που βρίσκονται συνήθως στα γραφεία μεταγωγής κινητής τηλεφωνίας. Όπως φαίνεται στη γενική αρχιτεκτονική backhaul (Σχήμα 2.1), σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις απαιτείται μια πρόσθετη συσκευή μπροστά από τον BSC/RNC για τον τερματισμό των προαναφερθέντων ζεύξεων μεταφοράς RAN backhaul. Σε αυτό το πλαίσιο, οι λειτουργίες που εκτελούνται από τη συσκευή σε τοποθεσία MSO είναι οι εξής:

- Αντιστοίχιση της διεπαφής δικτύου μεταφοράς ΙΜΗ σε κατάλληλη φυσική

διεπαφή του BSC/RNC.

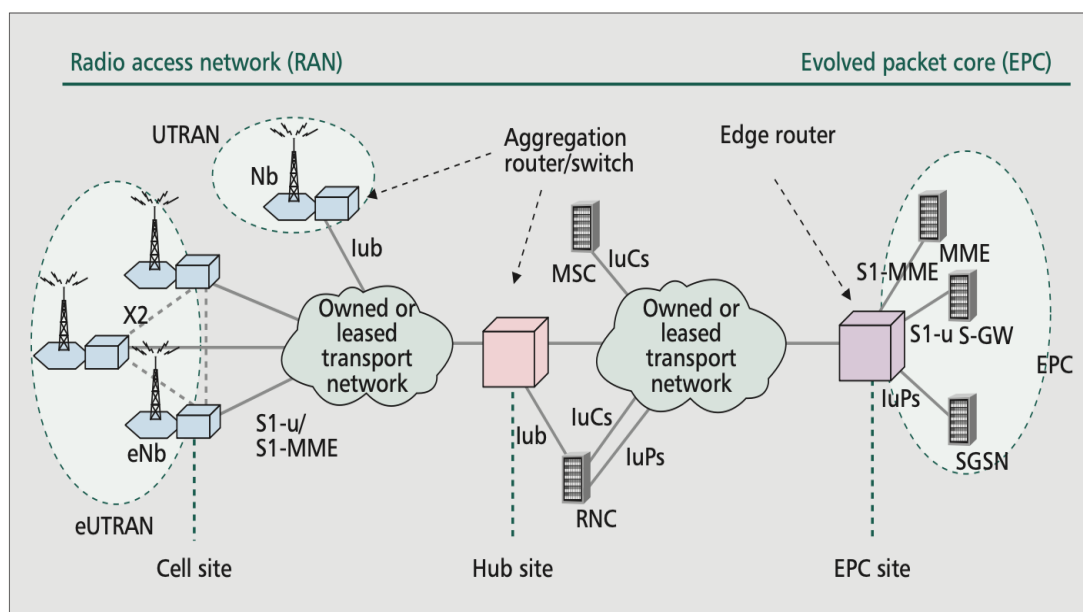
- Αντιστροφή της επεξεργασίας που εκτελείται στην τοποθεσία κυψέλης/διακομιστή για την ανάκτηση του αρχικού ωφέλιμου φορτίου από κάθε BTS/κόμβο B.
- Για την κίνηση 3G, συνάθροιση της κυκλοφορίας ATM ή IP από μεμονωμένους κόμβους B, που μεταφέρονται μέσω ανεξάρτητων συνδέσεων VC ή PPP, για τη δημιουργία ενός συνδυασμένου ωφέλιμου φορτίου για τον RNC.

Η εξέλιξη μιας συσκευής σε MSO καθοδηγείται από παρόμοιες τάσεις, δηλαδή τη μετάβαση των διεπαφών από TDM σε Ethernet και τη σύγκλιση του επιπέδου δικτύου σε IP. Στο επίπεδο της συσκευής, παρατηρείται επίσης παρόμοια τάση: οι πολυπλέκτες προσθήκης αφαίρεσης (ADM - Add Drop Multiplexer) και οι DCS (Distributed Control System) που αναπτύσσονται για τα σημερινά δίκτυα 2G/2.5G αναβαθμίζονται σε MSPPs και MSRs για τη διαχείριση της κίνησης 3G. Παρόλο που οι βασικές τάσεις είναι παρόμοιες, η κύρια διαφορά είναι ότι η «εξελιγμένη» συσκευή σε τοποθεσία MSO παρουσιάζεται με τη μορφή δύο λογικά ή φυσικά διαχωρισμένων συσκευών για τον τερματισμό της κυκλοφορίας 2G και 3G μπροστά από τον BSC και τον RNC, αντίστοιχα. Αυτή η διαφορά μπορεί να αποδοθεί κυρίως σε μια πολύ υψηλότερη απαίτηση χωρητικότητας για μια συσκευή τοποθεσίας MSO, η οποία υποτίθεται ότι τερματίζει την κυκλοφορία από εκατοντάδες BTS/Node Bs. Ως εκ τούτου, δικαιολογείται μια ξεχωριστή συσκευή, η κάθε μία βελτιστοποιημένη για το αντίστοιχο ωφέλιμο φορτίο της, γεγονός που μπορεί να μην ισχύει για μια συσκευή σε τοποθεσία κυψέλης ή ακόμη και για μια συσκευή σε τοποθεσία κόμβου.

2.5 Βασική αρχιτεκτονική της LTE RAN backhaul

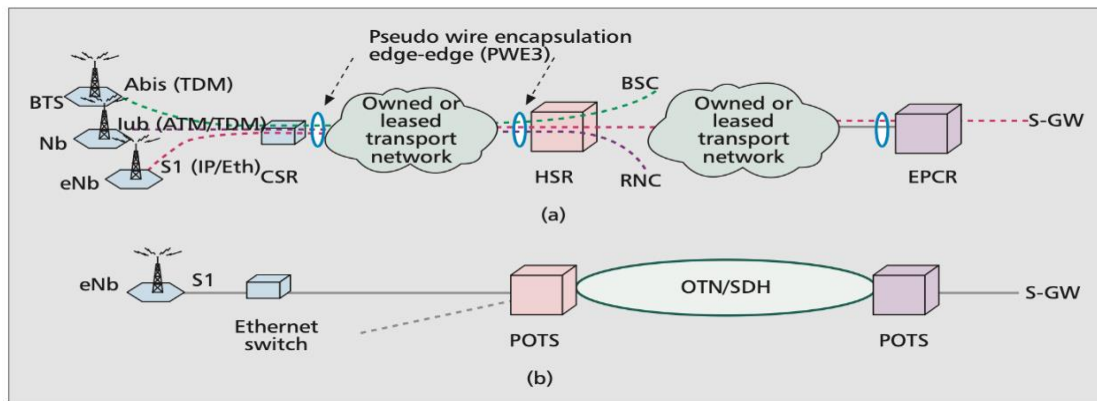
Στην υποενότητα 2.2 περιεγράφηκε η βασική αρχιτεκτονική backhaul που ισχύει για τις τεχνολογίες RAN 2G και 3G. Στην υποενότητα αυτή, επεκτείνουμε την ίδια αρχιτεκτονική για το σχεδιασμό της backhaul LTE. Δεδομένου ότι η αρχιτεκτονική συστήματος εξελιγμένου πακέτου (EPS - Evolved Packet System) έχει σχεδιαστεί για να παρέχει διαλειτουργικότητα με διάφορες τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης (RAT), συμπεριλαμβανομένου του UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) επίγειο RAN (UTRAN) και του βελτιωμένου UTRAN (eUTRAN) αναδεικνύεται η πιο κοινή περίπτωση διαλειτουργικότητας στην αρχιτεκτονική αναφοράς που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4.

Τα σημαντικότερα σημεία που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.4 αναφέρθηκαν προηγουμένως και για το λόγο αυτό τονίζονται τα διαφοροποιητικά χαρακτηριστικά για την ικανοποίηση των απαιτήσεων LTE. Για τον σχεδιασμό του backhaul δικτύου, ένα από τα διακριτά χαρακτηριστικά του EPS είναι η υποστήριξη της αρχιτεκτονικής IP. Παράλληλα με την υιοθέτηση ανοικτών διεπαφών IP, το Ethernet έχει γίνει η de facto τεχνολογία επιπέδου 2 για το κινητό RAN και τον εξοπλισμό κορμού.



Σχήμα 2.4: Αρχιτεκτονική αναφοράς LTE RAN backhaul [7].

Αυτό ισχύει και για την υποδομή 3G, όπως το HSPA, αλλά όχι για την προηγούμενη γενιά ραδιοτεχνολογιών 3G, όπου η υποστήριξη διεπαφών βασισμένων σε IP ήταν προαιρετική. Ως εκ τούτου, αναμένεται ότι για τις βασιζόμενες σε προηγούμενες υλοποιήσεις του LTE, θα εξακολουθούν να υπάρχουν απαιτήσεις διεπαφής με βάση τον ασύγχρονο τρόπο μεταφοράς (ATM) ή ακόμη και με βάση την πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDM) για την μεταφορά backhaul μέχρι να καταργηθούν σταδιακά αυτές οι παλαιότερες τεχνολογίες. Ο σχεδιασμός του δικτύου backhaul για το LTE με υποστήριξη πολλαπλών RAT με διεπαφές που δεν βασίζονται σε IP μπορεί να αντιμετωπιστεί με διάφορους τρόπους. Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζονται δύο από τις επιλογές.



Σχήμα 2.5: (a) Ενσωματωμένος, (b) Επιλογές μεταφοράς επικάλυψης Ethernet για το LTE backhaul [7].

- Ενσωματωμένος σχεδιασμός δικτύου backhaul:** Ένα κοινό δίκτυο backhaul χρησιμοποιείται για τη μεταφορά πολλαπλών τύπων ωφέλιμου φορτίου από την τοποθεσία κυψέλης στο EPC. Ο δρομολογητής θέσης κυψέλης (CSR - Cell Site Router), ο δρομολογητής θέσης κόμβου (HSR - Hub Site Router) και ο δρομολογητής EPC (EPCR) υποστηρίζουν όλοι τις διεπαφές IP/μεταγωγή ετικετών πολλαπλών πρωτοκόλλων (MPLS) για τη μεταφορά της κίνησης backhaul από RAT πολλαπλών γενεών μέσω ψευδοκαλωδίων. Οι διεπαφές που βλέπουν προς το δίκτυο σε αυτούς τους δρομολογητές μπορεί να είναι όλες βασισμένες στο Ethernet. Για το CSR, οι διεπαφές στην πλευρά του πελάτη μπορεί να χρειάζονται ένα μείγμα υποστήριξης TDM, ATM και Ethernet. Τα ιδιόκτητα ή μισθωμένα δίκτυα που συνδέουν αυτούς τους δρομολογητές μπορεί να βασίζονται σε Ethernet ή IP.
- Σχεδιασμός δικτύου backhaul επικάλυψης Ethernet:** Στην περίπτωση αυτή το δίκτυο backhaul LTE σχεδιάζεται ως επικάλυψη πάνω από το υπάρχον δίκτυο backhaul για 3G/2G RATs. Η επικάλυψη του δικτύου LTE backhaul μπορεί να βασίζεται είτε στο Ethernet είτε στο IP/MPLS. Ωστόσο στο Σχήμα 2.5 (b) παρουσιάζεται μόνο μια επιλογή που βασίζεται στο Ethernet και ανήκει στον πάροχο. Για να διαφοροποιηθεί περαιτέρω αυτή η αρχιτεκτονική από την επιλογή (a), οι συσκευές backhaul του κόμβου και της τοποθεσίας EPC απεικονίζονται ως οπτικό σύστημα μεταφοράς πακέτων (POTS - Packet Optical Transport System) που παρέχει υπηρεσίες μεταφοράς οπτικού δικτύου (OTN - Optical Transport Network) ή σύγχρονης ψηφιακής ιεραρχίας (SDH - Synchronous Digital Hierarchy) στις μεταγωγές Ethernet που τοποθετούνται στις τοποθεσίες κυψελών ή/και κόμβων. Στην περίπτωση αυτή, η επικάλυψη μη-LTE μπορεί να

βασίζεται σε οποιαδήποτε από τις τεχνολογικές επιλογές που αναφέρονται στις παραπάνω υποενότητες.

Η επιλογή μεταξύ του ενσωματωμένου σχεδιασμού ή της επικάλυψης Ethernet του backhaul δικτύου είναι συνήθως μια επιχειρηματική απόφαση που καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, όπως οι υφιστάμενες τεχνολογικές επενδύσεις στην υποδομή backhaul και της διείσδυσης του LTE σε σχέση με τις RAT προηγούμενης γενιάς.

2.6 Ειδικές Απαιτήσεις RAN backhaul για το LTE και επιλογές σχεδίασης

Το LTE εισήγαγε αρκετές απαιτήσεις για το σχεδιασμό του δικτύου backhaul όπως περιγράφονται στις παρακάτω υποενότητες.

2.6.1 Συνολική Απαίτηση Εύρους Ζώνης στην Τοποθεσία Κουβέλης

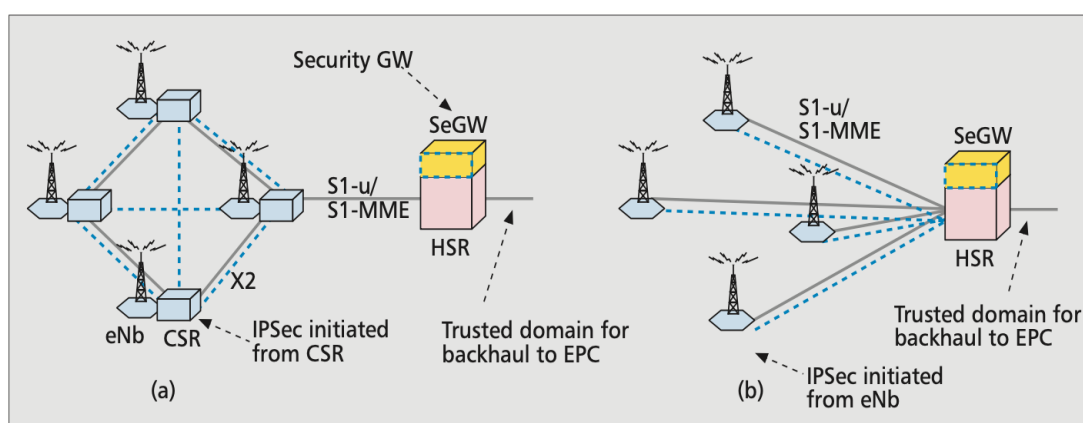
Η διεπαφή αέρα LTE έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί με ποικίλα εύρη καναλιών, σχήματα διαμόρφωσης και διαμορφώσεις κεραιών. Ως εκ τούτου, ο υπολογισμός του θεωρητικού μέγιστου ρυθμού κατερχόμενης ζεύξης (DL - DownLink) εξαρτάται από την πραγματική διαμόρφωση σχεδιασμού που χρησιμοποιείται σε ένα δεδομένο δίκτυο. Για τον υπολογισμό του αναμενόμενου φορτίου κίνησης σε ένα CSR, υποθέτουμε φασματική απόδοση 8.64 bps για 2x2 MIMO (Multiple Input Multiple Output) DL. Για ένα eNb 3 τομέων που λειτουργεί με πλάτος καναλιού 10 MHz αυτό μεταφράζεται σε 259 Mbps μέγιστο ρυθμό. Ωστόσο, η αύξηση των bits ανά δευτερόλεπτο ανά hertz για μια ασύρματη τεχνολογία καθιστά δυσκολότερη την επαναχρησιμοποίηση συχνότητας με αποτέλεσμα τη μείωση της φασματικής απόδοσης του συστήματος. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός backhaul με μέγιστο ρυθμό 200 Mbps καθ' όλη τη χρονική διάρκεια από κάθε eNb είναι πιο ρεαλιστικός. Η μέγιστη απόδοση από το eNb συνδυάζεται περαιτέρω από τον πάροχο με διάφορες παραμέτρους για τις ζεύξεις αέρα καθώς και τις ζεύξεις μεταφοράς για να καθοδηγήσει την απαιτούμενη χωρητικότητα διεπαφής backhaul σε κάθε CSR. Χρησιμοποιώντας μεγάλα εύρη καναλιού και στοιχειοκεραίες MIMO, το High Speed DL Packet Access + (HSDPA+) επιτυγχάνει επίσης πολύ παρόμοια φασματική απόδοση με αυτή που παρουσιάστηκε για το LTE παραπάνω. Επομένως, για ένα HSDPA+ Nb 3 τομέων που λειτουργεί με εύρος καναλιού 5 MHz μπορεί να αναμένεται μέγιστος ρυθμός 100 Mbps. Για έναν ελεγκτή ραδιοδικτύου (RNC) με δεδομένη χωρητικότητα παρόχου, η αύξηση του ρυθμού δεδομένων ανά Nb λόγω της αναβάθμισης του HSDPA μπορεί να οδηγήσει στη μείωση του αριθμού των Nbs που μπορούν να διαχειριστούν ανά RNC. Στην περίπτωση αυτή ο πάροχος μπορεί

να προτιμήσει να μετακινήσει αυτούς τους RNCs από τον κορμό σε μεγαλύτερες τοποθεσίες κόμβων. Η αλλαγή στη δυναμική θέση των RNC παρουσιάζεται στο διάγραμμα αναφοράς του Σχήματος 2.4.

Με τη χρήση των παραδοχών για τον μέγιστο ρυθμό δεδομένων ανά τοποθεσία κυψέλης, το HSR και το EPCR, καθένα από τα οποία συγκεντρώνει κίνηση από 20 και 100 τοποθεσίες κυψέλης αντίστοιχα, μπορεί να χρειαστεί να διαχειριστεί μέγιστους ρυθμούς δεδομένων 6 Gbps και 30 Gbps, αντίστοιχα. Αναμένεται, ωστόσο, ότι το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης θα είναι μη-αυτοχρονισμένης φύσης, όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο σχεδιασμός υπερσυνδρομητών για την backhaul μεταφορά που θα οδηγήσει στην ελαχιστοποίηση του κόστους του δικτύου. Σε ένα τέτοιο μοντέλο η υποστήριξη QoS από άκρο σε άκρο, μέσω διαφοροποιημένων υπηρεσιών (DiffServ - Differentiated Service) ή παρόμοιων τεχνικών, καθίσταται αναγκαία για την ικανοποίηση των απαιτήσεων της εφαρμογής πραγματικού χρόνου και αναλύεται παρακάτω.

2.6.2 Υποστήριξη για την διεπαφή X2 και ασφάλεια τομέα δικτύου μέσω IP_{SEC}

Για το LTE, η διεπαφή X2 εισήχθη για να διευκολύνει τις γρήγορες μεταγωγές μεταξύ ομάδων eNbs. Όσον αφορά τη χρησιμότητα της διεπαφής X2, αυτή θα χρειαστεί ειδικά όταν το VoLTE (Voice over LTE) θα αναπτυχθεί ευρέως. Σχετικά με την βέλτιστη τοποθεσία μεταγωγής για την διεπαφή X2 παρουσιάζονται δύο επιλογές στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Επιλογές για το χειρισμό της διεπαφής X2 και του τερματισμού IPsec στο πλαίσιο του backhaul [7].

Η επιλογή στο Σχήμα 2.6 (a) υποθέτει ότι ένα CSR έχει αναπτυχθεί σε όλες τις θέσεις eNb, επομένως η μεταγωγή ή δρομολόγηση του X2 μπορεί να γίνει στο CSR. Η επιλογή στο Σχήμα 2.6 (b) υποθέτει ότι δεν έχει αναπτυχθεί τέτοιο CSR. Ως εκ τούτου, ο δρομολογητής συγκέντρωσης HSR, που τοποθετείται στην τοποθεσία κόμβου,

χειρίζεται την διεπαφή X2. Το βέλτιστο μέρος για το χειρισμό της διεπαφής X2 είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην τοποθεσία κυψέλης, καθώς η μεταφορά της X2 μέχρι το δρομολογητή EPC θα εισάγει περιττές καθυστερήσεις και θα καταστήσει σχεδόν άχρηστη την ύπαρξη της διεπαφής X2, η οποία προορίζεται για την υποδοχή βραχυχρόνιων εκρήξεων δεδομένων. Επομένως, σε περιπτώσεις όπου το CSR δεν έχει αναπτυχθεί ή δεν έχει αρκετή κλίμακα για να χειριστεί την απαίτηση πλήρους συνδεσιμότητας πλέγματος του X2, το HSR γίνεται το πιο λογικό μέρος για το χειρισμό της διεπαφής X2.

Η χρήση της κρυπτογράφησης με βάση το IPsec για τη διασύνδεση S1 και X2 αποτελεί παρόμοιο κομμάτι με αυτό που περιεγράφηκε για το χειρισμό της μεταγωγής της διασύνδεσης X2 παραπάνω. Η υποστήριξη του IPsec μπορεί να είναι υποχρεωτική ή προαιρετική, ανάλογα με το αν οι διεπαφές S1 και X2 μεταφέρονται μέσω μη αξιόπιστων ή αξιόπιστων τομέων. Δύο επιλογές για την υποστήριξη του IPsec παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6 (a) και (b). Εάν ένα CSR είναι τοποθετημένο στο χώρο της κυψέλης, είναι δυνατή η εκκίνηση «σηράγγων» IPsec από το CSR αντί του eNb, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6 (a). Εάν το CSR δεν είναι διαθέσιμο, οι IPsec σήραγγες θα ξεκινούν από το eNb, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6 (b).

Ο τερματισμός της IPsec σήραγγας για τις διεπαφές S1 και X2 μπορεί να πραγματοποιηθεί σε διάφορα σημεία κατά μήκος του backhaul δικτύου ή στο ίδιο το EPC. Δεδομένου ότι ένας μεγάλος αριθμός παρόχων κινητής τηλεφωνίας έχουν αναπτύξει ή σχεδιάζουν να αναπτύξουν τη δική τους υποδομή μεταφοράς μεταξύ κόμβου και τοποθεσιών EPC, χωρίς απώλεια γενικότητας μπορεί να υποτεθεί ότι ο αξιόπιστος τομέας για το backhaul δίκτυο ξεκινά από τη θέση HSR. Με βάση αυτές τις εκτιμήσεις, στο Σχήμα 2.6 (a) και (b), φαίνεται ότι μια πύλη ασφαλείας IPsec (SeGW - Security Gateway) αναπτύσσεται στη θέση HSR.

2.6.3 Κατανομή Συχνότητας και Συγχρονισμός Φάσης

Οι RATs που βασίζονται σε πρότυπα 3GPP επέβαλαν συγχρονισμό συχνότητας μεταξύ των σταθμών βάσης και των RNCs για τη σωστή λειτουργία των RANs. Ωστόσο, με το LTE υπάρχει η ανάγκη υποστήριξης του συγχρονισμού φάσης για ορισμένα σενάρια, όπως:

- Όταν το LTE λειτουργεί σε λειτουργία διπλής διαίρεσης χρόνου (TDD - Time Division Duplex)

- Όταν είναι ενεργοποιημένο το MIMO πολλαπλών χρηστών στη λειτουργία διπλής διαίρεσης συχνότητας (FDD - Frequency Division Duplex)
- Όταν αναπτύσσεται υπηρεσία μετάδοσης ευρυεκπομπής και πολλαπλής διανομής σε δίκτυο μιας συχνότητας (MBSFN- Multicast Broadcast Single Frequency Network).

Ανάλογα με τα σχέδια ενός παρόχου να υποστηρίξει αυτά τα συγκεκριμένα σε-
νάρια, ο συγχρονισμός φάσεων μπορεί να θεωρηθεί είτε υποχρεωτικός είτε προαιρετι-
κός.

Όταν τα δίκτυα backhaul βασίζονταν σε κυκλώματα TDM μέσω σύγχρονων ο-
πτικών δικτύων/δικτύων σύγχρονης ψηφιακής ιεραρχίας (SONET/ SDH), αυτός ο συγ-
χρονισμός ήταν ενσωματωμένος στο υποκείμενο επίπεδο μεταφοράς. Ωστόσο, η μετά-
βαση σε τεχνολογίες μεταφοράς βασισμένες σε πακέτα, όπως το Ethernet, δημιουργεί
την ανάγκη για έναν ειδικό μηχανισμό για τη μεταφορά αυτών των πληροφοριών συγ-
χρονισμού από την πηγή χρόνου αναφοράς στους σταθμούς βάσης. Από αυτή την ά-
ποψη, οι δύο πιο κοινές τεχνολογικές επιλογές που συζητούνται στη βιομηχανία είναι
το σύγχρονο Ethernet (SyncE - Synchronous Ethernet) που βασίζεται στο πρότυπο
G.8261 της ITU και το πρωτόκολλο ακρίβειας χρόνου (PTP - Precision Time Protocol)
που βασίζεται στο πρότυπο 1588v2 της IEEE.

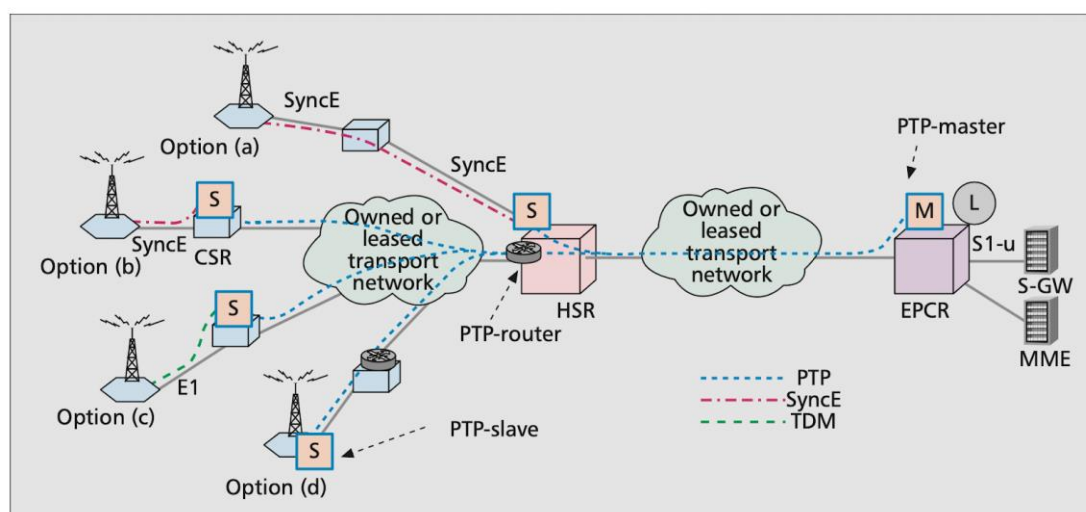
Το σύγχρονο Ethernet διανέμει τις πληροφορίες συγχρονισμού συχνότητας μέσω
μιας φυσικής διεπαφής Ethernet. Θεωρείται απλό στην εφαρμογή του με ελάχιστη πρό-
σθετη υποστήριξη με υλικό (hardware). Ωστόσο, τα μειονεκτήματα είναι ότι δεν παρέ-
χει συγχρονισμό φάσης και απαιτεί ότι κάθε κόμβος στο δίκτυο θα πρέπει να γνωρίζει
το SyncE με άμεση φυσική συνδεσιμότητα SyncE μεταξύ γειτονικών κόμβων, γεγονός
που συνεπάγεται σημαντικές επενδύσεις αναβάθμισης.

Το PTP διανέμει τον συγχρονισμό συχνότητας και φάσης μέσω μεταφοράς με
βάση το πακέτο μεταξύ κόμβων με επίγνωση του PTP και δεν εξαρτάται από το υπο-
κείμενο φυσικό επίπεδο. Οπότε υποστηρίζεται ο συγχρονισμός συχνότητας και φάσης
και δεν υπάρχει η απαίτηση να υλοποιηθεί σε όλο το δίκτυο. Ωστόσο απαιτείται ειδικό
hardware για χρονικές μετρήσεις και η απόδοση συγχρονισμού εξαρτάται από το σχε-
διασμό του υποκείμενου φυσικού δικτύου.

Είναι δύσκολο να υποστηρίξει κανείς ότι μόνο ένα από αυτά τα πρωτόκολλα
μπορεί να ικανοποιήσει τις ποικίλες ανάγκες συγχρονισμού των συνεχώς εξελισσόμε-
νων δικτύων backhaul. Με βάση αυτή την υπόθεση, στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται ένα

υβριδικό σχήμα συγχρονισμού που αναδεικνύει διάφορες επιλογές στη διάθεση ενός σχεδιαστή δικτύου backhaul.

Για την επιλογή (a), το HSR ενεργεί ως PTP slave και διανέμει τον συγχρονισμό συχνότητας μέσω του SyncE για τα φυσικά συνδεδεμένα CSR και eNb. Για τις επιλογές (b) - (d), το HSR ενεργεί ως δρομολογητής PTP, μεταβιβάζοντας τα μηνύματα PTP στους slave κόμβους χρησιμοποιώντας προώθηση IP unicast. Για την επιλογή (b), το



Σχήμα 2.7: Διανομή συγχρονισμού συχνότητας και φάσης εντός του backhaul [7].

CSR ενεργεί ως PTP slave και διαβιβάζει τις πληροφορίες συγχρονισμού μέσω του SyncE σε ένα συνδεδεμένο μέσω Ethernet eNb. Η επιλογή (c) είναι παρόμοια με την επιλογή (b) με την υπόθεση ότι ο eNb συνδέεται με ένα CSR μέσω κυκλωμάτων TDM. Επομένως, ο συγχρονισμός από το CSR στο eNb επιτυγχάνεται μέσω των κυκλωμάτων TDM. Ως εκ τούτου, ο συγχρονισμός από το CSR στο eNb επιτυγχάνεται μέσω του τομέα TDM. Τέλος, η επιλογή (d) υποθέτει ότι το eNb γνωρίζει το PTP και μπορεί να ενεργεί ως slave για να λαμβάνει τόσο τις πληροφορίες συγχρονισμού συχνότητας όσο και φάσης. Ο πάροχος μπορεί να χρησιμοποιήσει μερικές ή όλες αυτές τις επιλογές σε διάφορα μέρη του δικτύου με βάση τις δυνατότητες του εξοπλισμού που αναπτύσσονται στον κόμβο και στις τοποθεσίες κυψελών.

Εκτός από το SyncE και το PTP, το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (GPS - Global Positioning System) παρέχει επίσης ισχυρό συγχρονισμό συχνότητας καθώς και συγχρονισμό χρόνου/φάσης. Από αυτή την άποψη, οι πάροχοι που βρίσκονται στη διαδικασία μετάβασης στο LTE με βάση την υπάρχουσα υποδομή 3GPP2 έχουν πλεονέκτημα, καθώς τα RAN πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (CDMA) έχουν ιστορικά συγχρονιστεί με τη βοήθεια δεκτών GPS στο χώρο της

κυψέλης. Επομένως, η υπάρχουσα υποδομή GPS μπορεί να χρησιμοποιηθεί ή να ενισχυθεί για να ικανοποιήσει τον συγχρονισμό συχνότητας, φάσης/χρόνου των RANs LTE.

2.6.4 Σχεδιασμός Μικρών Κυψελών

Εξαιτίας της αυξημένης ζήτησης δεδομένων και της περιορισμένης φασματικής αποδοτικότητας του LTE σε σχέση με τα υπάρχοντα RAT 3G επιχειρείται ο σχεδιασμός μικρών κυψελών στο πλαίσιο της αρχιτεκτονικής LTE. Ως εκ τούτου, οι επιθυμητές απαιτήσεις κάλυψης και χωρητικότητας μπορεί τελικά να οδηγήσουν τους παρόχους να αναπτύξουν κόμβους μικροκυψελών και pico-κυψελών για να αυξήσουν το σχεδιαζόμενο μακροκυψελωτό αποτύπωμα για το LTE. Δεδομένου ότι οι micro και pico κόμβοι θα αναπτυχθούν σε μεγάλες ποσότητες σε μη συμβατικές τοποθεσίες, ο σχεδιασμός του backhaul δικτύου για την αρχιτεκτονική μικρών κυψελών χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή για την ελαχιστοποίηση του κόστους και της λειτουργικής πολυπλοκότητας ενός τέτοιου δικτύου. Υπάρχουν διάφορες επιλογές για την παροχή της backhaul ζεύξης για τους μικρούς κόμβους (π.χ. ενσύρματες broadband, ασύρματες και υπηρεσίες μεταφοράς με βάση τις οπτικές ίνες). Δεδομένου ότι ορισμένοι από τους κόμβους micro/pico θα είναι τοποθετημένοι σε στύλους ή σε κλωβούς, όπου η πρόσβαση σε οπτικές ίνες μπορεί να είναι περιορισμένη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σταθερή ευρυζωνική σύνδεση, όπως η εμπορική υπηρεσία DSL, για την επιστροφή της κίνησης στο EPC.

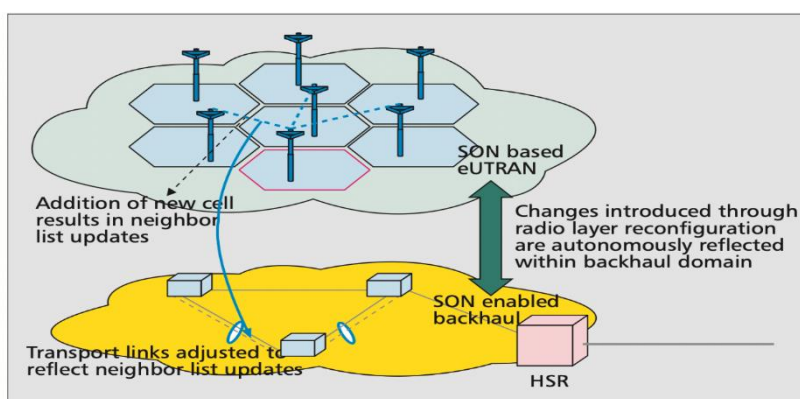
Σε μέρη όπου δεν υπάρχει δυνατότητα ενσύρματης ευρυζωνικής σύνδεσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ασύρματες τεχνολογίες backhaul για τη μεταφορά της κίνησης πίσω σε μια τοποθεσία κόμβου. Για την αντιμετώπιση των απαιτήσεων μεγέθους και κόστους που σχετίζονται με το σχεδιασμό μικρών κυψελών, οι τεχνολογίες ασύρματης backhaul χωρίς οπτική επαφή (NLOS), όπως το TDD-LTE και το WiFi, θα είναι πιο κατάλληλες από τις συμβατικές backhaul τεχνολογίες ασύρματης LOS.

2.6.5 Αυτό-οργανωμένο Δίκτυο

Μια από τις κινητήριες δυνάμεις για το σχεδιασμό του LTE ήταν η μείωση του κόστους και της πολυπλοκότητας των RAN. Δεδομένου ότι το λειτουργικό κόστος αποτελεί συνήθως σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους, εισήχθη η έννοια του αυτό-οργανωμένου δικτύου (SON - Self Organized Network) για την ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους των RAN. Οι προτεινόμενες περιπτώσεις χρήσης στο πλαίσιο

του 3GPP και της Συμμαχίας Κινητών Δικτύων Επόμενης Γενιάς (NGMN - Next Generation Mobile Networks) καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα κατηγοριών, όπως ο σχεδιασμός, η ανάπτυξη, η αυτοδιαμόρφωση, η αυτοβελτιστοποίηση και η διαχείριση σφαλμάτων. Είναι πολύ πιθανό ο πάροχος να υιοθετήσει το SON μέσω μιας σταδιακής προσέγγισης, όπου αρχικά οι περιπτώσεις χρήσης υποστηρίζονται σε χειροκίνητη ή ημιαυτόματη λειτουργία. Ωστόσο, μόλις η εμπιστοσύνη του παρόχου οικοδομήσει τις διαδικασίες και τους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται στη χειροκίνητη λειτουργία, η αυτοδιαμόρφωση και η αυτοβελτιστοποίηση μπορούν να ενεργοποιηθούν.

Για την περίπτωση όπου ο πάροχος έχει αποφασίσει να αναπτύξει δυνατότητες SON για την αυτοματοποίηση της διαμόρφωσης και βελτιστοποίησης ενός RAN, έχει νόημα να αναμένει την ίδια δυνατότητα από την υποκείμενη μεταφορά. Υποστηρίζεται ότι το πλεονέκτημα της αυτοδιαμόρφωσης και βελτιστοποίησης των παραμέτρων ραδιοεπικοινωνίας από μόνο του μπορεί να οδηγήσει σε μερική μόνο μείωση του κόστους λειτουργίας, εάν αυτές οι αναδιαμορφώσεις έχουν ως αποτέλεσμα αλλαγές στο επίπεδο μεταφοράς που πρέπει να τεθούν σε ισχύ μέσω συμβατικών χειροκίνητων διαδικασιών. Άρα, η υπόθεση ότι η χρήση ενός SON στο ραδιοεπίπεδο θα απαιτήσει τελικά τη χρήση παρόμοιων δυνατοτήτων στο πλαίσιο της μεταφοράς backhaul δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα. Η έννοια της κοινής αυτοδιαμόρφωσης των επιπέδων ραδιοεπικοινωνίας και μεταφοράς παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8. Αυτό το χαρακτηριστικό θα απαιτούσε την άμεση διασύνδεση backhaul με δυνατότητα SON, με το SON που έχει αναπτυχθεί για το ραδιοεπίπεδο. Επομένως, οποιεσδήποτε αλλαγές κατά την αναδιαμόρφωση του ραδιοεπιπέδου που απαιτούν αντίστοιχες αλλαγές στο backhaul δίκτυο μπορούν να ενεργήσουν αυτόνομα.



Σχήμα 2.8: Συντονισμός της λειτουργίας SON εντός του ραδιοτομέα και του τομέα backhaul [7].

2.6.6 Διαχείριση QoS

Μία από τις σημαντικές βελτιώσεις που εισήχθησαν στην αρχιτεκτονική EPS είναι η απλοποίηση του μοντέλου QoS. Το απλουστευμένο μοντέλο QoS αποτελείται από τις διαπραγματευόμενες τιμές για το QCI (QoS Class Identifier) και την προτεραιότητα διατήρησης κατανομής (ARP - Allocation Retention Priority). Κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης φορέα EPS, με βάση τις απαιτήσεις της εφαρμογής, η συγκεκριμένη τιμή QoS διαπραγματεύεται μεταξύ UE και P-GW (Packet Data Network Gateway). Το πρότυπο 3GPP Rel 8 καθορίζει έως και εννέα τιμές για το QCI. Αυτά τα τυποποιημένα QCI έχουν σαφώς καθορισμένα χαρακτηριστικά QoS, όπως η προτεραιότητα, η καθυστέρηση και η απώλεια πακέτων, έτσι ώστε να μπορεί να εξασφαλιστεί καθορισμένη QoS σε ένα περιβάλλον πολλαπλών προμηθευτών. Σε περιόδους συμφόρησης, η τιμή ARP χρησιμοποιείται από το δίκτυο για να επιτρέψει ή να αποκλείσει ορισμένους παρόχους κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης ή της τροποποίησης. Το EPS υποστηρίζει 15 τιμές για το ARP σε σύγκριση με τις τρεις τιμές που παρέχονται στα δίκτυα 2G/3G.

Ένα από τα πλεονεκτήματα του απλοποιημένου μοντέλου QoS εντός του EPS είναι η απλή αντιστοίχιση των διαπραγματεύσιμων τιμών QCI στο επίπεδο μεταφοράς. Ως εκ τούτου, ως μέρος της διαχείρισης του φορέα EPS, ο P-GW και ο eNb μπορούν να αντιστοιχίσουν τις τιμές QCI σε αντίστοιχα σημεία κώδικα DiffServ (DSCPs) εντός των επικεφαλίδων IP και των p-bits εντός της ετικέτας εικονικού LAN (VLAN) των πλαισίων Ethernet για την κίνηση downlink και uplink, αντίστοιχα.

Η χρήση της σήμανσης DSCP ή p-bits επιτρέπει συνεπή επεξεργασία QoS για την εφαρμογή χρήστη στο επίπεδο παρόχου καθώς και στο επίπεδο μεταφοράς των επιλογών αρχιτεκτονικής που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.5 (a) και (b) αντίστοιχα. Εκτός από τη διαχείριση QoS σε επίπεδο φορέα, το EPS ορίζει επίσης τη διαχείριση QoS σε επίπεδο υπηρεσίας που λειτουργεί σε μεμονωμένες ροές εντός κάθε φορέα EPS. Η εν λόγω διαχείριση QoS ορίζεται ως μέρος της αρχιτεκτονικής ελέγχου πολιτικής και χρέωσης (PCC - Policy and Charging Control).

3 Κεφάλαιο: Προκλήσεις για το backhaul δίκτυο και μοντέλα κίνησης

3.1 Εισαγωγή

Το 5G είναι η επόμενη γενιά κινητής τηλεφωνίας και αναμένεται να ικανοποιήσει την αυξανόμενη ζήτηση για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων καθώς και να επιτρέψει το Διαδίκτυο των πραγμάτων. Έχουν αντιμετωπιστεί οι αντίστοιχες προκλήσεις από την πλευρά των δικτύων ραδιοπρόσβασης, ενώ παράλληλα χρησιμοποιούνται προηγμένα χαρακτηριστικά, όπως η πύκνωση του δικτύου, οι μαζικές κεραιές πολλαπλών εισόδων-πολλαπλών εξόδων, η συντονισμένη επεξεργασία πολλαπλών σημείων, οι τεχνικές άμβλυνσης παρεμβολών μεταξύ κυψελών, η συνάθροιση φερόντων και η εξερεύνηση νέου φάσματος. Παρ' όλα αυτά, έχει αναδυθεί ένα νέο σημείο συμφόρησης στη backhaul. Οι εξαιρετικά πυκνές και μεγάλης κυκλοφορίας κυψέλες θα πρέπει να συνδέονται με το δίκτυο κορμού μέσω της backhaul, συχνά με μεγάλες απαιτήσεις όσον αφορά τη χωρητικότητα, την καθυστέρηση, τη διαθεσιμότητα, την ενέργεια και την αποδοτικότητα κόστους.

3.2 Προκλήσεις και εξέλιξη της αρχιτεκτονικής backhaul

Οι κοινωνικές αλλαγές, που παρατηρούνται από την έκρηξη των υπηρεσιών δεδομένων, και η αυξανόμενη επιθυμία για ασύρματη ευρυζωνικότητα έχουν δώσει κίνητρο για την ταχεία ανάπτυξη της πέμπτης γενιάς κυψελωτών συστημάτων (5G). Προκειμένου να καλυφθεί η αναμενόμενη χωρητικότητα, οι βασικοί παράγοντες προβλέπουν την ανάγκη για μια «επανάσταση» σε ορισμένες πτυχές των παλαιών συστημάτων, συνοδευόμενη από βελτιώσεις στις υπάρχουσες τεχνολογίες. Με βάση την ανάπτυξη του 5G, έχουν εντοπιστεί πολλές υποσχόμενες τεχνολογίες: υπερπυκνά δίκτυα (UDN - Ultra-Dense Network), προηγμένα σχήματα συντονισμού παρεμβολών μεταξύ κυψελών (ICIC - Inter-Cell Intereference Coordination), μαζική επεξεργασία πολλαπλών εισόδων-πολλαπλών εξόδων (MIMO) και συντονισμένη επεξεργασία πολλαπλών σημείων (CoMP - Coordinated MultiPoint), κεντριοποιημένη επεξεργασία νέφους και αποσύνδεση επιπέδου χρήστη/ελέγχου.

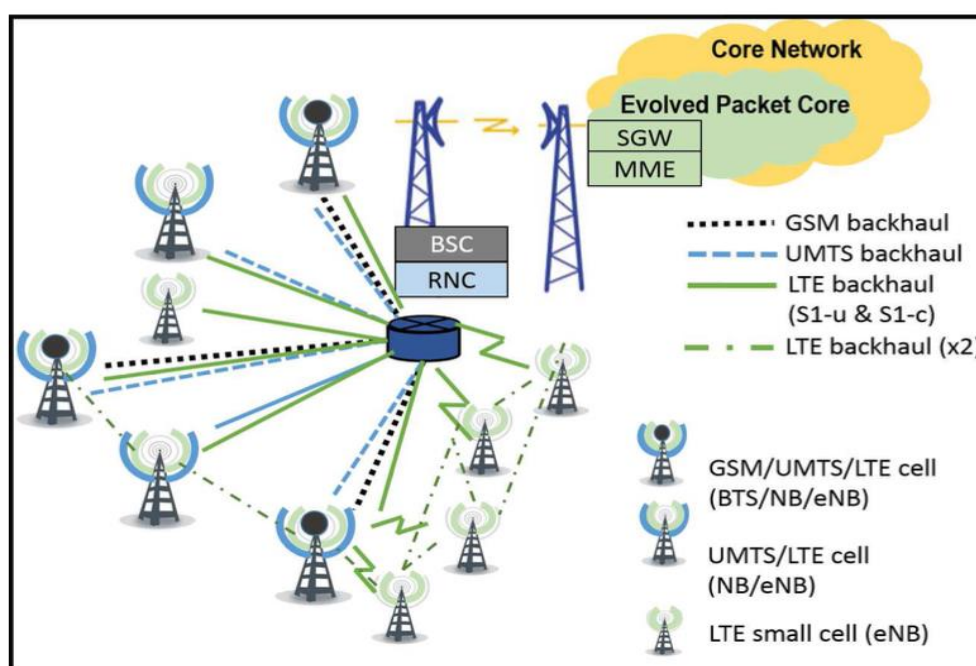
Τα UDN είναι συχνά ετερογενή δίκτυα (HetNets - Heterogeneous Networks), δηλαδή πολυεπίπεδα δίκτυα που περιλαμβάνουν παλαιές μακροκυψέλες υψηλής ισχύος και πολύ πυκνές κυψέλες με χαμηλότερη ισχύ (μικρές κυψέλες). Οι μικρές κυψέλες

είναι ικανές για πολλαπλές τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης (multi-RAT - multi Radio Access Technologies) και αποτελούν ουσιαστικό μέρος των UDN, τα οποία θεωρούνται επιτακτική λύση 5G. Ο διαμοιρασμός του φάσματος σε ένα UDN απαιτεί ευφυή συντονισμό, ακύρωση ή εκμετάλλευση των παρεμβολών μεταξύ των κυψελών. Κατά συνέπεια, έχουν αναπτυχθεί βασικοί ραδιοπόροι που διευκολύνουν το UDN: CoMP και βελτιωμένο ICIC (eICIC - enhanced ICIC). Η αυξανόμενη ανάγκη σε ισχύ επεξεργασίας σε συνδυασμό με την αναδυόμενη ποικιλομορφία των μικρών κυψελών στα πρότυπα κίνησης, τόσο χωρικά όσο και χρονικά, καθιστούν την έννοια του κεντρικού δικτύου ραδιοπρόσβασης (C-RAN - Centralized Radio Access Network) πολύ ελκυστική. Το C-RAN συνίσταται στη διάσπαση των λειτουργιών του παραδοσιακού εξελιγμένου κόμβου B (eNB, δηλαδή του κυψελωτού ραδιοφωνικού σταθμού) και την μετακίνησή τους προς μια απομακρυσμένη κοινή δεξαμενή πόρων βασικής ζώνης, που αναφέρεται ως μονάδα βασικής ζώνης (BBU). Οι βασικές ραδιολειτουργίες παραμένουν στο ραδιοχώρο, εξού και η ορολογία απομακρυσμένη ραδιομονάδα (RRU - Remote Radio Unit). Η αρχιτεκτονική C-RAN εκμεταλλεύεται την ποικιλομορφία των αιχμών κυκλοφορίας και, ως εκ τούτου, βελτιώνει την αποδοτικότητα χρήσης της υποδομής. Ταυτόχρονα, προωθεί την πράσινη πτυχή του 5G, λόγω της εγγύτητας των κυψελών και χρηστών και των αντίστοιχων χαμηλότερων απαιτήσεων ισχύος μετάδοσης.

Μια άλλη πρόκληση που προκύπτει από τα UDN είναι η διαχείριση της κινητικότητας των χρηστών. Παραδοσιακά, οι χρήστες που μετακινούνται από μια κυψέλη σε μια άλλη απαιτούν μια διαδικασία μεταγωγής που διαχειρίζεται η οντότητα διαχείρισης κινητικότητας στο RAN. Εάν αυτό το μοντέλο εφαρμοζόταν στα UDN, θα δημιουργούσε έναν υπέρογκο πλεονασμό ψηφίων σηματοδότησης λόγω των περιορισμένων εκτάσεων των μικρών κυψελών, άρα συχνή διέλευση των ορίων των κυψελών. Κατά συνέπεια, ο διαχωρισμός των επιπέδων δεδομένων και ελέγχου είναι μια άλλη βασική τεχνολογία 5G: οι μικρές κυψέλες χρησιμοποιούνται ως σημεία εκφόρτωσης δεδομένων, ενώ η μεταγωγή κινητικότητας ενεργοποιείται όταν οι χρήστες μετακινούνται μεταξύ συστάδων σε αντίθεση με τις μικρές κυψέλες. Οι περισσότεροι από τους παρουσιαζόμενους παράγοντες που διευκολύνουν την υλοποίηση είτε δεν είναι καινούργιοι είτε δεν είναι «έξυπνοι» ως αυτόνομες τεχνικές, αλλά η ενοποιησή τους σε μια ολοκληρωμένη συντονισμένη λύση οδηγεί σε καινοτομία, όπως το προηγμένο C-RAN. Παρόλο που αυτές οι τεχνολογίες μπορούν δυνητικά να αντιμετωπίσουν τις απαιτήσεις χωρητικότητας του 5G και τις μειωμένες κεφαλαιακές και λειτουργικές

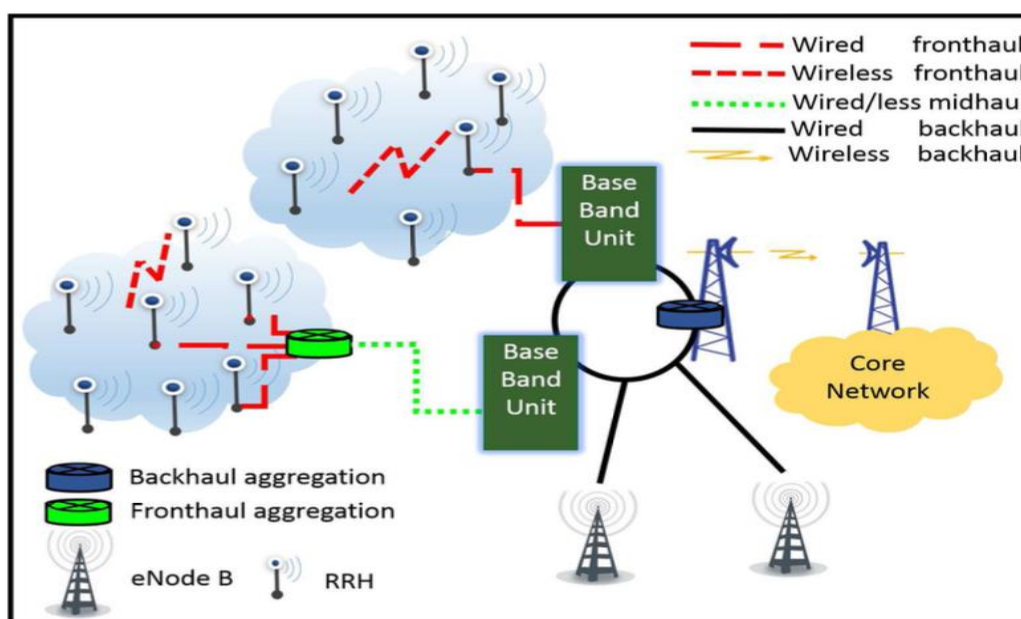
δαπάνες που σχετίζονται με το RAN (CapEX - Capital Expenditure και OpEX - Operational Expenditure), εντούτοις προέκυψε μια νέα πρόκληση: το 5G backhaul.

Το backhaul δίκτυο(ή αλλιώς back-net ή backbone ή δίκτυο μεταφοράς), στα κυψελωτά δίκτυα, είναι το δίκτυο που συνδέει τους eNBs με το δίκτυο κορμού και αποτελείται κυρίως από αποκλειστικές ζεύξεις οπτικών ινών, χαλκού, μικροκυμάτων και περιστασιακά δορυφορικές ζεύξεις. Στις προ-LTE (Long term evolution) κυψελοειδείς γενιές, ο κόμβος ραδιοελεγκτή λειτουργεί συχνά ως σημείο συγκέντρωσης backhaul, συγκεντρώνοντας έτσι τις συνδέσεις backhaul από όλους τους ραδιοσταθμούς εντός της εμβέλειας του, προς τον κορμό. Η αρχιτεκτονική του LTE δεν χρησιμοποιεί κόμβο ραδιοελεγκτή, ωστόσο, η συγκέντρωση backhaul παραμένει επιθυμητή τόσο για ενσύρματες όσο και για ασύρματες συνδέσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Σε αυτό το Σχήμα απεικονίζονται ο GSM ελεγκτής σταθμού βάσης (BSC) και ο UMTS ελεγκτής ραδιοδικτύου (RNC) που συστεγάζονται και χρησιμοποιούνται ως backhaul σημεία συγκέντρωσης για τους BTS, κόμβο B και eNB backhaul ζεύξεις. Ο eNB συνδέεται άμεσα με την πύλη εξυπηρέτησης (SGW - Service Gateway) για μετάδοση δεδομένων χρήστη πάνω από τη διεπαφή S1-u και η οντότητα διαχείρισης κινητικότητας (MME) για έλεγχο μετάδοσης δεδομένων πάνω από την διεπαφή S1-c. Επίσης, οι εντός eNB διεπαφές, αναφέρονται ως X2 και συχνά δρομολογούνται μέσω του σημείου συγκέντρωσης.



Σχήμα 3.1: Ο BSC και ο RNC συνυπάρχουν και χρησιμοποιούνται ως σημεία συγκέντρωσης για τους BTS, Node B και eNB backhaul ζεύξεις [8].

Με την άνοδο της αρχιτεκτονικής C-RAN, το backhaul δίκτυο του 5G έχει εξελιχθεί σε ένα πιο σύνθετο δίκτυο που αποτελείται από fronthaul, midhaul και backhaul. Το τμήμα backhaul που συνδέει την απομακρυσμένη ραδιοκεφαλή (RRH) απευθείας με τη μονάδα βασικής ζώνης (BBU) ή με ένα ενδιάμεσο σημείο συγκέντρωσης, χαρακτηρίζεται ως fronthaul. Το βασικό fronthaul υποτίθεται ότι εκτελείται μέσω μιας κοινής δημόσιας διεπαφής ραδιοεπικοινωνίας (CPRI - Common Public Radio Interface) που διαχωρίζει τη RRH από τη BBU. Λόγω των αυστηρών απαιτήσεων του fronthaul με βάση το CPRI, διερευνώνται νέες διεπαφές, όπως η fronthaul-lite, η διεπαφή fronthaul επόμενης γενιάς (NGFI - Next Generation Fronthaul Interface) ή η xHaul. Επίσης, η διασύνδεση με βάση την διεπαφή X2 μεταξύ των eNB ονομάζεται midhaul, ο οποίος όρος αναφέρεται στην ομάδα συνδέσεων που συνδέει τον συγκεντρωτή fronthaul με το σημείο συγκέντρωσης backhaul (βλ. Σχήμα 3.2). Ενώ οι συνδέσεις δικτύου μεταξύ των σημείων συγκέντρωσης και του κορμού, με βάση τη διεπαφή S1, έχουν διατηρήσει τον όρο backhaul. Στην παρούσα εργασία ο όρος backhaul χρησιμοποιείται για ολόκληρο το δίκτυο μεταφοράς, συμπεριλαμβανομένων των midhaul και fronthaul.



Σχήμα 3.2: Παράδειγμα δικτύου 5G κινητής τηλεφωνίας backhaul που αποτελείται από fronthaul, midhaul και παραδοσιακό backhaul [8].

Το περιοριστικό εύρος ζώνης μεγαλύτερο από 10 Gbps και η μέγιστη επιτρεπόμενη καθυστέρηση της τάξης των εκατοντάδων μικροδευτερολέπτων, καθιστούν τις οπτικές ίνες, ίσως τη μόνη βιώσιμη λύση για τη fronthaul. Ωστόσο, η τοποθέτηση οπτικών ινών για τη σύνδεση όλων των προβλεπόμενων RRH με τον κορμό μπορεί να

είναι αδύνατη σε ορισμένες περιπτώσεις και σίγουρα πολύ δαπανηρή σε αντίθετη περίπτωση. Ενόψει της τεράστιας πρόκλησης που αντιμετωπίζει η ανάπτυξη του 5G, η έρευνα για το 5G backhaul έχει στόχο τη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ των απαιτήσεων που ορίζει το 5G RAN και των ρεαλιστικών δυνατοτήτων backhaul από δύο διαφορετικές οπτικές γωνίες. Η πρώτη συνίσταται στην εξέλιξη της τρέχουσας backhaul (μικροκύματα, οπτικές ίνες, χαλκός κ.λπ.) ώστε να ανταποκρίνεται στις προσδοκίες του 5G και να περιλαμβάνει νέες ασύρματες τεχνολογίες, όπως εντός ζώνης ζεύξεις (επαναχρησιμοποίηση του φάσματος ραδιοπρόσβασης), μικροκύματα (mmWave), οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου (FSO - Free Space Optical communications) και υπο-6GHz (π.χ. WiMAX - Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiFi). Η άλλη προοπτική της backhaul εξετάζει την προσαρμογή του 5G RAN στο διαθέσιμο backhaul δίκτυο με ρεαλιστικές επιδόσεις, όπως η διερεύνηση ενδιάμεσων αρχιτεκτονικών RAN μεταξύ του C-RAN και του κατακευματισμένου RAN (D-RAN) ώστε να ταιριάζει στις δυνατότητες fronthaul.

Στην παρούσα εργασία, εξηγείται το πρόβλημα του 5G backhaul, εξετάζονται οι προτεινόμενες λύσεις και προτείνονται νέες για την προσαρμογή του backhaul στα διάφορα σενάρια 5G, ενώ παράλληλα προσφέρεται ένα ενοποιημένο όραμα ενός δυναμικού, ευέλικτου και προσαρμοστικού πλαισίου 5G backhaul. Αρχικά, προσδιορίζονται και ποσοτικοποιούνται τα χαρακτηριστικά του 5G με υψηλό αντίκτυπο στην απόδοση του backhaul. Στη συνέχεια, οι διαθέσιμες λύσεις backhaul κατηγοριοποιούνται ως προς τις αντίστοιχες ονομαστικές επιδόσεις και τους περιορισμούς τους. Η ενότητα 3.3 παρουσιάζει τα παλαιά δίκτυα backhaul και αναλύει τον τρόπο με τον οποίο τα χαρακτηριστικά του 5G επηρεάζουν τη backhaul και την αντίστοιχη απαίτησή τους. Οι τεχνολογίες backhaul ταξινομούνται σε έξι μεγάλες κατηγορίες: οπτικές ίνες, ασύρματα, με δυνατότητα SDN, με δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης, πράσινες προσπάθειες και κοινή RAN-backhaul αντίληψη. Η ενότητα 3.4 ολοκληρώνει το κεφάλαιο με τα μοντέλα κίνησης backhaul.

3.3 Οι κύριες ερευνητικές κατευθύνσεις στις τεχνολογίες backhaul

Τα τελευταία χρόνια έχει καταγραφεί πληθώρα διαφορετικών προσπαθειών, από διαφορετικούς ερευνητικούς φορείς, που σχετίζονται με το μέλλον της back-hauling, συμπεριλαμβανομένων των παρόχων υπηρεσιών δικτύου, των κατασκευαστών εξοπλισμού και των ακαδημαϊκών ιδρυμάτων. Τα θέματα της έρευνας καλύπτουν μια πολύ ευρεία περιοχή και συχνά είναι αλληλένδετα. Πρόσφατες εξελίξεις στα οπτικά δίκτυα

θα καλυφθούν πρώτα, δεδομένου ότι οι οπτικές ίνες είναι συχνά η προτιμώμενη τεχνική επιλογή για τη backhaul (ενότητα 3.3.1). Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε τις πρόσφατες εργασίες σχετικά με την μικροκυματική ζώνη, που είναι μεταξύ άλλων ασύρματων τεχνολογιών μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση για τα σημεία όπου η οπτική ίνα δεν είναι εφαρμόσιμη είτε τεχνικά είτε οικονομικά (Ενότητα 3.3.2). Ακολουθεί μια ενότητα που περιγράφει λεπτομερώς την άφιξη και την ενσωμάτωση του SDN στο δίκτυο μεταφοράς, καλύπτοντας, μεταξύ άλλων, τόσο τις οπτικές τεχνολογίες όσο και τις μικροκυματικές τεχνολογίες (ενότητα 3.3.3). Η ενεργειακή απόδοση στην backhauling είναι ένα άλλο σημαντικό θέμα που έχει κερδίσει προσοχή και αγγίζει διαφορετικές τεχνολογίες, ενώ συχνά περιλαμβάνει δυνατότητες αυτοβελτιστοποιημένων δικτύων (SON - SelfOrganized Network) (Ενότητα 3.3.4). Η προσωρινή αποθήκευση δεδομένων πέτυχε μεγάλα κέρδη στην τεχνολογία του διαδικτύου και τώρα ενσωματώνεται στο κινητό δίκτυο σε διάφορα επίπεδα, επηρεάζοντας ωστόσο τη backhaul (Ενότητα 3.3.5). Τέλος, θα παρουσιαστούν παραδείγματα κοινού σχεδιασμού και βελτιστοποίησης RAN και backhaul για να καταδειχθούν οι δυνατότητες αυτής της σύμπραξης στην άρση της συμόρφωσης του δικτύου (ενότητα 3.3.6).

3.3.1 Εξελίξεις στα οπτικά δίκτυα

Οι συνδέσεις οπτικών ινών αποτελούν ιδανική λύση για τη σύνδεση του fronthaul λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών τους, δηλαδή χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή χωρητικότητα, που ανταποκρίνονται στις αυστηρές απαιτήσεις της αρχιτεκτονικής C-RAN. Επιπλέον, πολλές πόλεις στις μέρες μας διαθέτουν αξιόπιστο δίκτυο οπτικών ινών, το οποίο θα μπορούσε να αξιοποιηθεί περαιτέρω για την παροχή του fronthaul της κινητής τηλεφωνίας. Έχουν διερευνηθεί τα οφέλη της αρχιτεκτονικής PtmP (Point to multi-Point), επαναχρησιμοποιώντας την υπάρχουσα τοποθετημένη οπτική ίνα προς τον κόμβο, σε αντίθεση με την ανάπτυξη PtP (Point to Point). Αυτά παρουσιάζουν μειώσεις κόστους που φθάνουν το 60% με τη χρήση παθητικού οπτικού δικτύου (PON - Passive Optical Network) με έναν κόμβο συγκέντρωσης που πολυπλέκει/φιλτράρει συνδέσεις fronthaul σε μικρές κυψέλες.

Στο σημείο αυτό παρέχεται μια συγκριτική ανάλυση της πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου (TDM - Time Division Multiplexing) και της πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (WDM - Wavelength Division Multiplexing) για αρχιτεκτονικές PtmP. Τα συστήματα TDM-PON, όπως το GPON (Gigabit Passive Optical Network) και το GE-PON (Gigabit Ethernet Passive Optical Network), αναπτύσσονται ως FTTH (Fiber To

The Home), προσφέροντας ρυθμούς της τάξης του ενός Gigabit ανά δευτερόλεπτο και αναβαθμίζονται σε XG-PON ή 10G-EPON, μεταφέροντας έτσι το TDM-PON στην κατηγορία των 10 Gbps. Κατά συνέπεια, το TDM-PON είναι μια οικονομικά αποδοτική λύση που θα μπορούσε να καλύψει τη ζήτηση χωρητικότητας του 5G fronthaul. Ωστόσο, η αναμενόμενη καθυστέρηση, ιδίως στην ανερχόμενη ζεύξη, δεν συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις. Επιπλέον, το TDM-PON αποτελεί μια άκαμπτη αρχιτεκτονική που εμποδίζει την εύκολη και δυναμική προσαρμοστικότητα και επεκτασιμότητα, περιορίζοντας έτσι τη συγκέντρωση πόρων. Από την άλλη πλευρά, το WDM-PON επιτρέπει τον φυσικό διαμοιρασμό του μέσου οπτικής ίνας από πολλές μονάδες οπτικού δικτύου (ONU - Optical Network Unit), ενώ παρέχει μια εικονική αρχιτεκτονική PtP με υλοποίηση μήκους κύματος PtP. Το WDM-PON επιλύει όλα τα προβλήματα που αντιμετωπίζει το TDM-PON, δηλαδή επιτρέπει την κλιμακούμενη, δυναμική και προσαρμοστική κατανομή πόρων με χαμηλή καθυστέρηση. Φυσικά, αυτά τα πλεονεκτήματα μεταφράζονται άμεσα σε πιθανή μείωση των συνδέσεων οπτικών ινών και σε χαμηλότερες δαπάνες κεφαλαίου λόγω του διαμοιρασμού και της συγκέντρωσης πόρων. Παρόλα αυτά, οι συσκευές WDM, όπως οι πομποδέκτες και οι πολυπλέκτες/αποπολυπλέκτες, εξακολουθούν να είναι πολύ δαπανηρές στην εγκατάσταση και τη συντήρηση. Επομένως, το πλεονέκτημα της μείωσης του CapEX δεν αξιοποιείται πλήρως σε αυτό το στάδιο. Λόγω του εγγενούς κόστους των WDM-PON, διερευνώνται περαιτέρω οι περιορισμοί των TDM-PON και παρέχεται μια λύση για τη μείωση της καθυστέρησης, η οποία οφείλεται κυρίως στον αλγόριθμο δυναμικής κατανομής εύρους ζώνης (DBA - Dynamic Bandwidth Allocation).

Σε άλλες έρευνες προτείνονται λύσεις, όπως η TWDM (Time and Wavelength Division Multiplexing) PON, που εισάγει σημεία συγκέντρωσης fronthaul και διευθετούνται με WDM-PON, ενώ οι ONUs εντός κάθε κόμβου συγκέντρωσης fronthaul διευθετούνται με αρχιτεκτονική TDM-PON. Αυτή η πρόταση προσφέρει μια ισορροπημένη λύση μεταξύ της απλότητας και του μειωμένου κόστους του TDM, ενώ παράλληλα αποκτά ένα επίπεδο δυναμικής ευελιξίας και προσαρμοστικότητας από την αρχιτεκτονική WDM. Η τυποποίηση του παθητικού οπτικού δικτύου επόμενης γενιάς, στάδιο 2 (NG-PON2), βασίζεται στο σύστημα TWDM-PON για την παροχή εύρους ζώνης 40 Gbps .

Μια άλλη λύση οπτικής τεχνολογίας εισάγει ένα σχήμα ορθογωνικής πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing) για την καθοδική ροή δεδομένων (downstream) σε συνδυασμό με ένα σχήμα TDM για την

ανοδική ροή δεδομένων (upstream). Η χρήση του OFDMA αιτιολογείται από τη δυνατότητα δημιουργίας εικονικών συνδέσεων PtP στο πεδίο της συχνότητας, εξυπηρετώντας έτσι υψηλή πυκνότητα κυψελών (200 κυψέλες με περισσότερα από 100 Mbps ανά κυψέλη). Το OFDMA δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το upstream, δεδομένου ότι οι μεταδόσεις δεν είναι συντονισμένες, αντ' αυτού, χρησιμοποιείται ένα έξυπνο υβριδικό σύστημα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος-ενισχυμένης ψηφιακής ραδιοεπικοινωνίας πάνω από οπτικές ίνες και TDMA, με αποτέλεσμα την μειωμένη καθυστέρηση (<1 msec). Συνεπώς παρέχει την απαιτούμενη ευελιξία, με υψηλή χωρητικότητα και χαμηλή καθυστέρηση σε μέτριο κόστος. Τέλος, άλλη έρευνα προωθεί την εισαγωγή ενός ενεργού απομακρυσμένου κόμβου (ARN - Active Remote Node) μεταξύ του κεντρικού γραφείου (CO - Central Office) και του τελικού χρήστη, δημιουργώντας έτσι ένα ενεργό (και όχι παθητικό) οπτικό δίκτυο.

Η backhaul με βάση τις οπτικές ίνες είναι μια κορυφαία ελκυστική λύση 5G λόγω της ανώτερης απόδοσής της σε σχέση με άλλες τεχνολογίες. Οι πρόοδοι σε αυτό το θέμα, όπως η μείωση της καθυστέρησης και η αποτελεσματική πολυπλεξία και συνάθροιση, είναι πολλά υποσχόμενες. Ωστόσο, όλες απαιτούν επεκτάσεις στις συνδέσεις οπτικών ινών για τη σύνδεση του πολλαπλασιασμού των μικρών κυψελών. Από την άλλη πλευρά, η κάλυψη FTTH ή FTTB (κτίριο) εξακολουθεί να είναι περιορισμένη παγκοσμίως και το έργο της τοποθέτησης νέων συνδέσεων οπτικών ινών για τη βελτίωσή της είναι αποθαρρυντικό λόγω των δύσκολων εκσκαφών και του συναφούς υπέρογκου κόστους, αποθαρρύνοντας τις ρυθμιστικές αρχές τηλεπικοινωνιών και τους παρόχους δικτύων στην προώθηση ενός τέτοιου εγχειρήματος. Για το σκοπό αυτό, μια εναλλακτική λύση, η οποία είναι εύκολη και οικονομικά αποδοτική στην ανάπτυξη, είναι ζωτικής σημασίας για τη γεφύρωση του υφιστάμενου δικτύου με οπτικές ίνες και των πανταχού παρόντων μικρών κυψελών σε ένα εξαιρετικά πυκνό δίκτυο. Η μικροκυματική ζώνη (mmWave) μπορεί να αποτελέσει μια τέτοια λύση, όπως εξετάζεται στην επόμενη υποενότητα.

3.3.2 Μικροκυματική ζώνη στη backhaul

Η αναμενόμενη υπερβολική χωρητικότητα και οι ρυθμοί δεδομένων αντιμετωπίζουν ένα παλαιό φάσμα που είναι υπερφορτωμένο. Τα προηγμένα χαρακτηριστικά, όπως το UDN, το eICIC, το CoMP, η μαζική MIMO και η συνάθροιση φερόντων είναι όλα απαραίτητα χαρακτηριστικά για την επίτευξη της χωρητικότητας στόχου, αλλά το φάσμα παραμένει ένα εμπόδιο που πρέπει να αποσυρθεί. Ένα μεγάλο κομμάτι στο

φάσμα 60 - 100 GHz παραμένει αναξιοποίητο και φαίνεται να αποτελεί αναπόφευκτη επιλογή για το 5G. Αυτό το εύρος ζώνης είναι σε μεγάλο βαθμό αχρησιμοποίητο, σε παγκόσμιο επίπεδο, αλλά τα χαρακτηριστικά διάδοσης στην εν λόγω περιοχή διαφέρουν σημαντικά. Κατά συνέπεια, συχνά χωρίζεται σε δύο ζώνες με την ακόλουθη ορολογία: τη ζώνη των 60 GHz (ή ζώνη V) και τη ζώνη E (>60 GHz).

Ένα πρωτοποριακό έργο του FP7 της ΕΕ, το BuNGee,⁶ προωθεί την υιοθέτηση της μικροκυματικής ζώνης για την ενεργοποίηση ευρυζωνικών δικτύων ραδιοπρόσβασης, χρησιμοποιώντας την mmWave self-backhauling. Λόγω της εγγενούς υψηλής απορροφητικότητας και της περιορισμένης κάλυψης, η μικροκυματική επικοινωνία είναι απρόσβλητη από παρεμβολές άλλων κυψελών, συνεπώς επιτρέπει τη στενή επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων και τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας του φάσματος. Η οπτική επαφή είναι μια αυστηρή απαίτηση για τη συνδεσιμότητα mmWave, ωστόσο, σε μια εφαρμογή backhaul/fronthaul, θα ήταν λιγότερο δύσκολο να διασφαλιστεί μια αξιόπιστη σύνδεση, δεδομένου ότι τα τελικά σημεία της σύνδεσης είναι σταθερά, επιτρέποντας έτσι την τοποθέτηση κεραιών υψηλού κέρδους με επιμελημένο τρόπο.

Για τους παραπάνω λόγους η μικροκυματική ζώνη παρουσιάζεται ως η εξέχουσα λύση για τα UDN στο 5G, που χρησιμοποιείται για την αύξηση των ρυθμών δεδομένων σε 10 Gbps με χαμηλότερες καθυστερήσεις (1 ms). Επιπλέον, προτείνονται η αυτοεπαναδρομολόγηση με βάση τη mmWave ζώνη και η δρομολόγηση με επίγνωση παρεμβολών για την αποφυγή δυσκίνητων και δαπανηρών ενσύρματων συνδέσεων fronthaul. Οι τοπικές μικρές κυψέλες μπορούν να συνδεθούν με έναν κόμβο συνάθροισης μέσω συνδέσεων PtmP στη ζώνη υπο-6GHz και συνδέσεων PtP στην ζώνη E μέσης χωρητικότητας και χαμηλού κόστους. Στην ανώτερη βαθμίδα της αρχιτεκτονικής, διάφοροι κόμβοι συνάθροισης συνδέονται μεταξύ τους με συνδέσεις ζώνης E, υψηλής χωρητικότητας PtP LOS. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική υπόσχεται μια ευέλικτη και επεκτάσιμη ετερογενή λύση με εύκολες αναβαθμίσεις και προσθήκες.

Η εντός ζώνης backhauling είναι μια άλλη κατεύθυνση που κερδίζει έδαφος για το 5G, η οποία συνίσταται στην επαναχρησιμοποίηση της ραδιοπρόσβασης για ασύρματες συνδέσεις backhaul. Τα πλεονεκτήματα αυτής της λύσης πηγάζουν κυρίως από την επαναχρησιμοποίηση του υλικού και του φάσματος, μεγιστοποιώντας έτσι τη χρήση των πόρων και μειώνοντας το CapEX. Ο κοινός προγραμματισμός backhaul εντός ζώνης και η μείωση των παρεμβολών στο 5G HetNet αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλά υποσχόμενα κέρδη απόδοσης χρήστη, ειδικά για

πυκνά δίκτυα. Η ανάπτυξη μικροκυματικής ζώνης σε HetNets χρησιμοποιείται για ραδιοπρόσβαση ή/και backhaul σε λειτουργία TDD.

Οι ασύρματες συνδέσεις είναι εξέχοντες υποψήφιοι για την κάλυψη των κενών των συνδέσεων οπτικών ινών στο δίκτυο 5G backhaul. Η εντός ζώνης backhauling είναι ελκυστική, καθώς δεν απαιτεί πρόσθετες επενδύσεις ή άδεια χρήσης φάσματος, αλλά ενδέχεται να μην ικανοποιεί τις ανάγκες σε εύρος ζώνης σε πολλά σενάρια. Τα μικροκύματα PtM_P, απαιτούν πρόσθετη άδεια φάσματος, αλλά επωφελούνται από την υψηλή αποδοτικότητα φάσματος δεδομένου ότι μοιράζονται από πολλές μικρές κυψέλες. Ωστόσο, μπορεί να οδηγήσουν σε έλλειψη εύρους ζώνης όταν εμφανίζονται ταυτόχρονες αιχμές κυκλοφορίας.

Τα μικροκύματα συνεπάγονται ελάχιστο κόστος άδειας και έχουν άφθονο εύρος ζώνης, αλλά πάσχουν από ευπάθεια στη σκίαση (shadowing), η οποία γίνεται καταστροφική σε ένα σενάριο από δρόμο σε στέγη ή από δρόμο σε δρόμο. Επιπλέον, η διάδοση μικροκυμάτων είναι περιορισμένη και ευαίσθητη στις καιρικές συνθήκες. Ωστόσο, οι εξελίξεις στον τομέα της μαζικής MIMO ενδέχεται να είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν αυτή την έλλειψη. Εν ολίγοις, η ασύρματη υποστήριξη είναι μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση στις συνδέσεις οπτικών ινών. Κάθε μια από τις λύσεις σε αυτό το χαρτοφυλάκιο έχει διακριτά πλεονεκτήματα και ελλείψεις, αλλά όλες είναι ευκολότερες και ενδεχομένως φθηνότερες στην ανάπτυξη από τις συνδέσεις οπτικών ινών.

3.3.3 SDN στη backhaul

Η αγορά του SDN και της εικονικής διαχείρισης λειτουργιών δικτύου (NFV - Network Function Virtualization) έχει φθάσει τα 11 δισεκατομμύρια δολάρια το 2018. [10]. Πρόκειται κυρίως για τις εικονικοποιημένες λειτουργίες δικτύου (VNF - Virtualized Network Function), αλλά και για θύρες, δρομολογητές, μεταγωγείς και οπτικό εξοπλισμό που έχουν αποκτήσει δυνατότητα SDN. Το Open Networking Foundation (ONF) είναι ο κινητήριος μοχλός πίσω από την προώθηση και την υιοθέτηση του SDN μέσω της ανάπτυξης ανοικτών προτύπων (π.χ. OpenFlow). Το SDN ουσιαστικά αποσυνδέει τον έλεγχο από τη λειτουργία προώθησης δεδομένων, με προγραμματισμένο τρόπο, δημιουργώντας έτσι μια δυναμική, ευέλικτη, οικονομικά αποδοτική και προσαρμόσιμη αρχιτεκτονική που παρέχει στους διαχειριστές πρωτοφανή αυτοματοποίηση και έλεγχο.

Το SDN σίγουρα κατακτά την κυψελοειδή δικτύωση και θεωρείται ως ένας κρίσιμος διευκολυντής για τα δίκτυα 5G από πολλούς βασικούς παίκτες. Θεωρείται ότι το SDN θα επιτρέψει σε πολλούς φορείς, με τεχνολογία multi-RAT, να μοιράζονται το ίδιο ετερογενές φυσικό δίκτυο, αξιοποιώντας έτσι τη χρήση των πόρων και μειώνοντας το CapEX και το OpEX. Επίσης, προτείνεται η χρήση της fronthaul με δυνατότητα SDN, με τη χρήση CPRI πάνω από Ethernet και του ARN. Περαιτέρω, η κατανομημένη ασφάλεια υλοποιείται, χρησιμοποιώντας SDN, με απευθείας συνδέσεις που περιορίζονται εντός του τομέα πρόσβασης, επιτυγχάνοντας έτσι χαμηλή καθυστέρηση.

Η ερευνητική ομάδα της NEC (National Electrical Code) εισάγει ένα νέο εργαλείο δικτύωσης καθορισμένο από λογισμικό: τον διαχειριστή πόρων backhaul, για την παροχή ενός ευέλικτου υβριδικού δικτύου υψηλής χωρητικότητας μικροκυματικών/οπτικών κινητών δικτύων backhaul [11]. Στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική, χρησιμοποιούνται μικροκυματικές τεχνολογίες 60 GHz και ζώνη E για backhaul τελευταίου μιλίου υψηλής χωρητικότητας και προ-συγκέντρωσης, που συμπληρώνονται με OFDMA-PON. Ο διαχειριστής πόρων backhaul εκτελεί αυτοματοποιημένη δυναμική παροχή πόρων και υπολογισμό διαδρομής με επίγνωση της χωρητικότητας, βελτιώνοντας κατά συνέπεια τη χρήση του δικτύου και την από άκρο σε άκρο QoE (Quality of Experience) του χρήστη.

Τα πλεονεκτήματα της ανάπτυξης ενός δικτύου backhaul με βάση το SDN είναι πολλαπλά. Πρώτον, ο συνεπαγόμενος διαχωρισμός του ελέγχου και της προώθησης δεδομένων διευκολύνει τη συνύπαρξη ετερογενών συνδέσεων backhaul. Επιπλέον, μια τέτοια αρχιτεκτονική επιταχύνει τις δυνατότητες πρόσθεσης, επέκτασης και δυναμικής ανακατανομής πόρων στο δίκτυο backhaul. Από την άλλη πλευρά, το SDN διαθέτει το δίκτυο backhaul για διαμοιρασμό πολλαπλών φορέων και πολλαπλών τεχνολογιών, μειώνοντας το κόστος ανά bit για τον τελικό χρήστη και μεγιστοποιώντας την αποδοτικότητα της χρήσης των πόρων. Παρόμοιες προσπάθειες για την εμπλοκή ανταγωνιστικών παρόχων υπηρεσιών δικτύου στην κοινή χρήση υποδομών δικτύου έχουν συχνά αντιμετωπίσει απρόθυμα ενδιαφερόμενα μέρη. Ωστόσο, το γεγονός ότι το SDN επιτρέπει στους παρόχους δικτύων να έχουν εικονικό έλεγχο του backhaul τους μπορεί να καταφέρει να τους πείσει, ιδίως όταν θίγονται από το αποτρεπτικό κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης του 5G backhaul. Από την άλλη πλευρά, ο διαχωρισμός του ελέγχου και της προώθησης δεδομένων εκθέτει το δίκτυο σε προκλήσεις ασφαλείας, ειδικά όταν χρησιμοποιείται με υπολογιστικό νέφος, λόγω κακόβουλης χρήσης ή δυσλειτουργίας του συστήματος. Οι λύσεις που προτείνονται ωστόσο επηρεάζουν

την καθυστέρηση απόκρισης του συστήματος και, σε ορισμένες περιπτώσεις, περιορίζουν την επεκτασιμότητα του δικτύου [8].

3.3.4 Ενεργειακή αποδοτικότητα στη backhaul

Η ενεργειακή αποδοτικότητα, στις επόμενες γενιές κυψελωτών δικτύων, είναι μια παγκόσμια και πρωταρχική απαίτηση που καθοδηγείται από την επιθυμία να μειωθεί το αποτύπωμα άνθρακα της επικοινωνίας, καθώς και οι λογαριασμοί ενέργειας και να παραταθεί η διάρκεια ζωής των μπαταριών των τερματικών. Τα συστήματα 5G αναμένεται να καλύψουν την εκρηκτική αύξηση των συσκευών και της χωρητικότητας χωρίς να προκαλέσουν δραματική αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας. Μέχρι πρόσφατα, οι μελέτες σχετικά με την ενεργειακή κατανάλωση των συστημάτων ασύρματων επικοινωνιών απέφευγαν τη συμβολή της backhaul, λόγω του ασήμαντου ρόλου της στα δίκτυα μακροκυψελών. Ωστόσο, με την εισβολή των μικρών κυψελών, την άνοδο των HetNets και τη δημιουργία UDNs, το ποσοστό της κατανάλωσης ενέργειας στη backhaul αναμένεται να αυξηθεί στο 50% [12]. Κατά συνέπεια, η επίλυση της συμφόρησης backhaul συνεπάγεται στην εξέταση της ενεργειακής πτυχής, η οποία είναι εξίσου σημαντική με τη χωρητικότητα και την καθυστέρηση.

Εξετάζονται τρία σενάρια ανάπτυξης για τη μελλοντική backhaul: οπτική ίνα στον κόμβο (FTTN) με VDSL2 στην κυψέλη, μικροκύματα και μια υβριδική λύση από οπτική ίνα στο κτίριο (FTTB) και μικροκύματα. Οι προσομοιώσεις στο [12], δείχνουν ότι το πρώτο σενάριο ανάπτυξης είναι ενεργειακά αποδοτικότερο από αυτό που χρησιμοποιεί μόνο μικροκύματα, ενώ το υβριδικό σενάριο υπερτερεί και των δύο σε ένα UDN, αξιοποιώντας την υπάρχουσα υποδομή οπτικών ινών. Αποδεικνύεται επίσης ότι η παροχή ασύρματων συχνοτήτων backhaul σε χαμηλότερες συχνότητες οδηγεί σε υψηλότερη ενεργειακή απόδοση. Επιπλέον, σε ένα δίκτυο μικρών κυψελών, η διαφορά στην κατανάλωση ενέργειας που προκύπτει από την ασύρματη συχνότητα καθίσταται αμελητέα λόγω του υψηλού κέρδους που επιτυγχάνεται με την αρχιτεκτονική backhaul.

Με κίνητρο τη σχεδίαση πράσινων δικτύων, προτείνεται ένα σχήμα κατανομής πόρων ICIC που έχει επίγνωση της ενέργειας, βελτιώνοντας έτσι την ενεργειακή απόδοση (έως και 50%) εις βάρος της μείωσης της αποδοτικότητας του φάσματος. Η κατανάλωση ενέργειας για τη backhaul ενσωματώνεται στον συνολικό ενεργειακό προϋπολογισμό και αποδεικνύεται ότι οι οπτικές ίνες καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια από τα μικροκύματα σε ένα ετερογενές backhaul. Επίσης αποδεικνύεται ότι τα μικροκύματα είναι η πιο αποδοτική λύση και ότι η backhaul θα μπορούσε να καταναλώσει έως

και το 78% της συνολικής ενέργειας εάν η παροχή γίνεται με χρήση τεχνολογίας υπό των 6GHz σε ένα σενάριο hotspot. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε ένα σχήμα συσχέτισης κυψελών με επίγνωση της ενέργειας που βασίζεται σε γνωστικό ευρετικό αλγόριθμο με δύο στόχους. Αρχικά, ο αλγόριθμος αυτός εκμεταλλεύεται τις διαθέσιμες πληροφορίες με επίγνωση του περιβάλλοντος για να βρει τη διαδρομή με τον μικρότερο αριθμό αλμάτων, προκειμένου να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση ενέργειας backhaul. Στη συνέχεια, επιλέγει τη λιγότερο φορτισμένη διαδρομή backhaul, σε περίπτωση που είναι διαθέσιμες περισσότερες από μία επιλογές, για να επιτύχει εξισορρόπηση φορτίου. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποδεικνύεται ότι βελτιώνει σταθερά την ενεργειακή απόδοση, ειδικά σε ένα σενάριο hotspot, στο οποίο παρατηρείται βελτίωση 42% σε σύγκριση με το κανονικό κριτήριο συσχέτισης UE που είναι η λαμβανόμενη ισχύς σήματος αναφοράς [13].

Η πράσινη λειτουργία του δικτύου 5G δεν είναι πλέον προαιρετική και ο ραγδαία αυξανόμενος ρόλος της backhaul στην κατανάλωση ενέργειας καθιστά την ενεργειακή αποδοτικότητα επιτακτικό στόχο του 5G backhaul. Η μεγάλη πρόκληση, ωστόσο, είναι η επίτευξη αυτού του στόχου χωρίς να διακυβεύονται άλλοι δείκτες επιδόσεων, όπως η απόδοση χρήστη ή η μέση καθυστέρηση πακέτων του δικτύου. Αυτή η πρόσφατη διάσταση καθιστά τη βελτιστοποίηση του δικτύου 5G (τόσο του RAN όσο και της backhaul) εξαιρετικά πολύπλοκη με πολλαπλούς στόχους και πολλαπλούς περιορισμούς. Για το σκοπό αυτό, το SON καθίσταται βασικό εργαλείο σε αυτή την προσπάθεια. Τα στοιχεία του δικτύου 5G, όπως οι ραδιοκυψέλες, τα σημεία συσσώρευσης, οι δρομολογητές κ.λπ., πρέπει να είναι εξοπλισμένα με SON, ενώ η ολική βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται από κοινού από το RANaaS (RAN as a Service) και μια παρόμοια οντότητα backhaul.

3.3.5 Προσωρινή αποθήκευση δεδομένων στη backhaul

Ένας πολλά υποσχόμενος τρόπος, που κερδίζει γρήγορα έδαφος, για την επίλυση της συμφόρησης της backhaul, είναι η προσωρινή αποθήκευση του περιεχομένου στην άκρη του δικτύου, δηλαδή στις μικρές κυψέλες και στα UEs. Η προσωρινή αποθήκευση, μετατρέπει τη νοημοσύνη του δικτύου από αντιδραστική (reactive) σε προνοητική (proactive) και αξιοποιεί τις τελευταίες εξελίξεις στην αποθήκευση, την επίγνωση του περιβάλλοντος και την κοινωνική δικτύωση. Έτσι, εάν τα δεδομένα των χρηστών είχαν προβλεφθεί και αποθηκευτεί εκ των προτέρων στην προσωρινή μνήμη κατά τη

διάρκεια περιόδων χαμηλής κίνησης, μπορούν να μεταδοθούν κατά τις ώρες αιχμής χωρίς να επιβαρύνουν τη backhaul, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται καλή QoE.

Ο ρόλος της προσωρινής αποθήκευσης σε ένα δίκτυο μικρών κυψελών, αφορά την ελάφρυνση της backhaul και την επικοινωνία D2D (Device-to-Device), όταν το πλαίσιο είναι προαποθηκευμένο σε ένα UE εντός εμβέλειας. Ένας καταναμημένος αλγόριθμος, βασισμένος στη μέθοδο των πολλαπλασιαστών εναλλασσόμενης κατεύθυνσης, βελτιστοποιεί την επιλογή αρχείων από έναν σταθερό κατάλογο για κάθε μικρή κυψέλη με δυνατότητα αποθήκευσης. Επίσης, ένα σύστημα συσχέτισης χρηστών που στοχεύει στη βελτίωση της QoE των χρηστών, αξιοποιεί τις δυνατότητες προσωρινής αποθήκευσης των μικρών κυψελών για την υπέρβαση των περιορισμών backhaul. Οι μικρές κυψέλες εξετάζουν μεμονωμένα τη διαθεσιμότητα περιεχομένου, τους υλοποιήσιμους ρυθμούς δεδομένων (σε σχέση με τις παρεμβολές και τη χωρητικότητα backhaul) και αποφασίζουν αναλόγως ποια UEs θα εξυπηρετήσουν.

Ένα νέο πλαίσιο λύσεων για την ευκαιριακή CoMP προτείνεται για την προσωρινή αποθήκευση μέρους των αρχείων πολυμέσων στις μικρές κυψέλες. Η πρόκληση είναι να αποφασιστεί ποια αρχεία θα προ-κωδικοποιηθούν, πώς θα δημιουργηθεί ενοικοδομητική προ-κωδικοποίηση MIMO και σε ποιες μικρές κυψέλες θα αποθηκευτεί το προ-κωδικοποιημένο αρχείο. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης μικτής χρονικής κλίμακας (βραχυπρόθεσμη για την προκωδικοποίηση MIMO και μακροπρόθεσμη για τον έλεγχο της κρυφής μνήμης) επιλύεται με την εκμετάλλευση των διαχωρισμών των χρονικών κλιμάκων.

Η επιτυχία της προσωρινής αποθήκευσης εξαρτάται να εξαρτάται από πολλές μελλοντικές προκλήσεις, όπως η χωρητικότητα αποθήκευσης των κυψελών, το πολύ μεγάλο μέγεθος των αρχείων, οι πολλοί χρήστες και η ανάγκη για γρήγορη και δυναμική μάθηση των κυψελών κατά τη λήψη της απόφασης προσωρινής αποθήκευσης. Με εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής μάθησης επιτυγχάνεται η προληπτική προσωρινή αποθήκευση. Παρόλο όμως που σημαντικές επιπλοκές παραμένουν άλυτες, οι δυνατότητες της προσωρινής αποθήκευσης είναι εντούτοις πολλά υποσχόμενες, καθιστώντας την μια εξέχουσα ερευνητική κατεύθυνση του 5G backhaul.

3.3.6 Κοινός σχεδιασμός και βελτιστοποίηση του RAN/Backhaul

Αν και το 3GPP θεωρεί ότι το backhaul δίκτυο είναι μια ξεχωριστή οντότητα από το RAN, εντούτοις, απαιτείται κάποιο επίπεδο συντονισμού μεταξύ του δικτύου backhaul και του δικτύου ραδιοπρόσβασης. Πράγματι, οι εξελίξεις στις οπτικές

τεχνολογίες προσανατολίζονται προς τη δυναμική κατανομή μήκους κύματος, τη συντονισμένη κατανομή πόρων RAN και backhaul και την προσθήκη του ενεργού απομακρυσμένου κόμβου, οι οποίοι επωφελούνται από την πρόσβαση σε πληροφορίες RAN. Η ενεργειακή αποδοτικότητα στο backhaul αντιμετωπίζει τις ενσύρματες και ασύρματες τεχνολογίες και αρχιτεκτονικές πρόσβασης backhaul ως μέρος του παγκόσμιου μοντέλου κατανάλωσης ενέργειας, συνεπώς, απαιτεί στενή συνεργασία μεταξύ RAN και backhaul δικτύου για να αποδώσει εποικοδομητικά αποτελέσματα. Η έρευνα σχετικά με το δίκτυο μεταφορών με δυνατότητα SDN αλληλοεπιδρά με όλες τις άλλες ερευνητικές κατευθύνσεις που παρουσιάστηκαν προηγουμένως και λειτουργεί ως καταλύτης για τη δυναμική, ευέλικτη και προσαρμοστική πράσινη backhaul. Κατά συνέπεια, το SDN ωφελεί και βασίζεται στον συντονισμό και την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ RAN και backhaul. Η προσωρινή αποθήκευση δεδομένων είναι ένα άλλο χαρακτηριστικό που αξιοποιεί την επίγνωση του πλαισίου και τις στιγμιαίες πληροφορίες δικτύου (π.χ. παρεμβολές συστήματος, απαιτήσεις QoS και χωρητικότητα backhaul) για την επίτευξη κερδών στην ελάφρυνση της κίνησης backhaul κατά τις ώρες αιχμής, κατά συνέπεια, ο συντονισμός μεταξύ RAN και backhaul είναι απαραίτητος.

Η συνεργασία backhaul και RAN ταξινομείται σε δύο διακριτές κατηγορίες: ευαισθητοποίηση backhaul/RAN και κοινός λειτουργικός σχεδιασμός RAN/backhaul. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα της backhaul/RAN αντίληψης, όπως η κατανομή πόρων με γνώση του backhaul δικτύου και η συσχέτιση κυψελών. Το RAN χρησιμοποιεί τις πληροφορίες backhaul για την ανακατανομή των χρηστών με τρόπο που μεγιστοποιεί την QoE των χρηστών και που προσαρμόζεται στους χρονικούς περιορισμούς backhaul. Έτσι, το προτεινόμενο σχήμα είναι μια τυπική κοινή αντίληψη backhaul/RAN, που υλοποιείται με τη χρήση δυνατοτήτων SON. Ένας κεντρικός μηχανισμός βελτιστοποίησης έχει χρησιμοποιηθεί για να ρυθμιστεί η αντιστάθμιση επέκτασης της εμβέλειας κυψέλης, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η μέση καθυστέρηση πακέτων δικτύου.

Από την άλλη πλευρά, ο κοινός λειτουργικός σχεδιασμός συνίσταται σε λειτουργίες σε επίπεδο δικτύου, όπως η βελτιστοποίηση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης ή η μεγιστοποίηση της φασματικής απόδοσης. Μια νέα αρχιτεκτονική για συστήματα επόμενης γενιάς είναι αυτή στην οποία τα επίπεδα δεδομένων και ελέγχου είναι αποσυνδεδεμένα. Οι RRH χρησιμοποιούνται για την εκφόρτωση δεδομένων, αλλά ένα σημείο αναφοράς (το οποίο ιδανικά υπερκαλύπτει πολλά RRH) διαμορφώνεται δυναμικά για το επίπεδο ελέγχου. Ένας κόμβος ελεγκτή δικτύου, ο οποίος επικοινωνεί με τον

ελεγκτή VeNB και τη backhaul με δυνατότητα SDN, βρίσκει ένα κατάλληλο σημείο αναφοράς για κάθε εισερχόμενο UE, με βάση την QoS. Καθορίζει επίσης τη βέλτιστη διαδρομή backhaul με βάση το σημείο αναφοράς, την QoS, καθώς και την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση ενέργειας στο RAN και τη backhaul, τη συμφόρηση και τις απαιτήσεις του VeNB. Ένα άλλο πλεονέκτημα του κοινού σχεδιασμού είναι ο ευέλικτος έλεγχος των τρόπων λειτουργίας CoMP ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, την κατάσταση του δικτύου και τους περιορισμούς backhaul.

Οι πάροχοι δικτύων 5G έχουν έναν πρωταρχικό στόχο: να μεγιστοποιήσουν τα έσοδά τους. Για το σκοπό αυτό πρέπει να μεγιστοποιήσουν την QoE των χρηστών για να αυξήσουν το μερίδιο αγοράς τους, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις δαπάνες του δικτύου. Στα προηγούμενα δίκτυα, η ραδιοπρόσβαση αποτελούσε το κύριο σημείο συμφόρησης και η βελτιστοποίηση του δικτύου συνίσταται σε μεγάλο βαθμό στη μείωση του αριθμού των κυψελών και στη μεγιστοποίηση της φασματικής αποδοτικότητάς τους. Από την άλλη πλευρά, το 5G συνοδεύεται από ευρύτερες προκλήσεις και νέες ευκαιρίες και η βελτιστοποίηση του δικτύου έχει γίνει μια προσπάθεια από άκρη σε άκρη, στην οποία ο κοινός σχεδιασμός RAN/backhaul διαδραματίζει κεντρικό ρόλο.

3.4 Μοντέλα κίνησης backhaul

Παρόλο που η backhaul κίνηση αποτελείται από διαφορετικούς τύπους κίνησης στα δίκτυα μικρών κυψελών, το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης προέρχεται από την κίνηση δεδομένων των χρηστών. Ωστόσο, η backhaul κίνηση που προκαλείται από τα πρωτόκολλα μετάδοσης στις διεπαφές S1 και η κίνηση backhaul μεταγωγής μεταξύ γειτονικών μικρών κυψελών αποτελούν σημαντικά μέρη της κίνησης backhaul. Επιπλέον, η ασύρματη κυκλοφορία που χρησιμοποιείται για τη διαχείριση και τον συγχρονισμό αγνοείται δεδομένου ότι η εν λόγω κυκλοφορία είναι προφανώς μικρότερη από την υπόλοιπη κυκλοφορία στα δίκτυα μικρών κυψελών. Θεωρώντας ιδανικές ασύρματες συνδέσεις backhaul μεταξύ των μικρών κυψελών και του MBS (Macrocell Base Station) ή του καθορισμένου SBS (Smallcell Base Station), η κίνηση δεδομένων χρήστη θεωρείται ότι σχετίζεται μόνο με το εύρος ζώνης και τη μέση αποδοτικότητα φάσματος σε κάθε κυψέλη. Χωρίς απώλεια γενικότητας, όλες οι μικρές κυψέλες υποτίθεται ότι έχουν το ίδιο εύρος ζώνης και την ίδια μέση αποδοτικότητα φάσματος. Σε αυτή την περίπτωση, η ρυθμαπόδοση backhaul μιας μικρής κυψέλης απλοποιείται ως η παραγωγή του εύρους ζώνης και της μέσης αποδοτικότητας φάσματος στη μικρή κυψέλη.

Η κατά 10% πλεονάζουσα κίνηση backhaul θεωρείται ότι παράγεται στις διεπαφές S1 και η κίνηση backhaul μεταγωγής κατά 4% θεωρείται ότι παράγεται στις διεπαφές X2 στα δίκτυα μικρών κυψελών [9].

3.4.1 Μοντέλο κίνησης backhaul σε κεντρικές λύσεις

Η κίνηση backhaul της κεντρικής λύσης περιλαμβάνει την ανερχόμενη και κατερχόμενη κίνηση στην μακροκυψέλη και τις μικρές κυψέλες. Η ανερχόμενη ρυθμαπόδοση μιας μικρής κυψέλης συμβολίζεται ως:

$$TH_{small-up}^{centra} = 0,04 \cdot B_{sc}^{centra} \cdot S_{sc}^{centra} \quad (3.1)$$

όπου B_{sc}^{centra} είναι το εύρος ζώνης μιας μικρής κυψέλης και S_{sc}^{centra} είναι η μέση αποδοτικότητα φάσματος μιας μικρής κυψέλης.

Η κατερχόμενη ρυθμαπόδοση μιας μικρής κυψέλης υπολογίζεται ως:

$$TH_{small-down}^{centra} = (1+0,1+0,04) \cdot B_{sc}^{centra} \cdot S_{sc}^{centra} \quad (3.2)$$

που μεταδίδεται μέσω της διεπαφής S1 των backhaul δικτύων.

Η ρυθμαπόδοση ανοδικής ζεύξης μιας μακροκυψέλης συμβολίζεται ως:

$$TH_{macro-up}^{centra} = 0,04 \cdot B_{mc}^{centra} \cdot S_{mc}^{centra} \quad (3.3)$$

όπου B_{mc}^{centra} είναι το εύρος ζώνης της μακροκυψέλης και S_{mc}^{centra} είναι η μέση αποδοτικότητα φάσματος μιας μακροκυψέλης.

Η κατερχόμενη ρυθμαπόδοση μιας μακροκυψέλης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TH_{macro-down}^{centra} = (1+0,1+0,04) \cdot B_{mc}^{centra} \cdot S_{mc}^{centra} \quad (3.4)$$

η οποία μεταδίδεται μέσω της διεπαφής S1 των backhaul δικτύων. Υποθέτουμε ότι η κίνηση backhaul είναι ομοιόμορφη σε κάθε μικρή κυψέλη. Ο συνολικός αριθμός των μικρών κυψελών σε μια μακροκυψέλη συμβολίζεται με N.

Η συνολική ανερχόμενη ρυθμαπόδοση backhaul της κεντρικής λύσης υπολογίζεται ως:

$$TH_{sum-up}^{centra} = N \cdot TH_{small-up}^{centra} + TH_{macro-up}^{centra} \quad (3.5)$$

και η συνολική κατερχόμενη ρυθμαπόδοση backhaul της κεντρικής λύσης υπολογίζεται ως:

$$TH_{sum-down}^{centra} = N \cdot TH_{small-down}^{centra} + TH_{macro-down}^{centra} \quad (3.6)$$

Κατά συνέπεια η συνολική ρυθμαπόδοση backhaul της κεντρικής λύσης υπολογίζεται ως:

$$TH_{sum}^{centra} = TH_{sum-up}^{centra} + TH_{sum-down}^{centra} \quad (3.7)$$

3.4.2 Μοντέλο κίνησης backhaul σε λύσεις διανομής

Στη λύση διανομής, οι γειτονικές μικρές κυψέλες προωθούν συνεργατικά την κίνηση backhaul σε ένα συγκεκριμένο SBS. Επομένως, όχι μόνο οι πληροφορίες καναλιού αλλά και τα δεδομένα χρήστη μοιράζονται σε γειτονικές συνεργατικές SBSs. Χωρίς απώλεια γενικότητας, οι γειτονικές συνεργατικές μικρές κυψέλες είναι δομημένες σε μια συνεργατική συστάδα και ο αριθμός των γειτονικών μικρών κυψελών σε μια συστάδα έστω K . Χωρίς να περιλαμβάνεται η καθορισμένη SBS που συλλέγει όλη την κίνηση backhaul από γειτονικές μικρές κυψέλες, η αποδοτικότητα φάσματος της συνεργατικής συστάδας συμβολίζεται ως:

$$S_{sc}^{Comp} = (K-1) \cdot S_{sc}^{dist} \quad (3.8)$$

όπου S_{sc}^{dist} είναι η αποδοτικότητα φάσματος της μικρής κυψέλης στη συνεργατική συστάδα. Λαμβάνοντας υπόψη τον πλεονασμό στη συνεργατική συστάδα, η ανερχόμενη ρυθμαπόδοση backhaul μίας συνεργατικής μικρής κυψέλης συμβολίζεται ως:

$$TH_{small-up}^{dist} = 1,14 \cdot B_{sc}^{dist} \cdot S_{sc}^{dist} \quad (3.9)$$

όπου B_{sc}^{dist} είναι το εύρος ζώνης της μικρής κυψέλης. Η κατερχόμενη ρυθμαπόδοση backhaul μίας συνεργατικής μικρής κυψέλης συμβολίζεται ως:

$$TH_{small-down}^{dist} = 1,14 \cdot B_{sc}^{dist} \cdot (S_{sc}^{dist} + S_{sc}^{comp}) \quad (3.10)$$

Επομένως, η συνολική ρυθμαπόδοση backhaul της λύσης διανομής είναι:

$$TH_{sum}^{dist} = K \cdot (TH_{small-up}^{dist} + TH_{small-down}^{dist}) \quad (3.11)$$

4 Κεφάλαιο: Προβλήματα διάδοσης στις μικροκυματικές συχνότητες και τεχνικές άμβλυνσης διαλείψεων για επίγεια δίκτυα

4.1 ITU-R P.837-6: Χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης για τη μοντελοποίηση της διάδοσης

Η σύσταση ITU-R P.837 περιέχει χάρτες μετεωρολογικών παραμέτρων που έχουν αποκτηθεί με τη χρήση της βάση δεδομένων ERA-40 του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προβλέψεων (ECMWF), η οποία συνίσταται για την πρόβλεψη των στατιστικών στοιχείων του ρυθμού βροχόπτωσης με χρόνο ολοκλήρωσης ενός λεπτού, όταν λείπουν τοπικές μετρήσεις. Τα στατιστικά στοιχεία ρυθμού βροχόπτωσης με χρόνο ολοκλήρωσης ενός λεπτού απαιτούνται για την πρόβλεψη εξασθένησης της βροχής σε επίγειες και δορυφορικές συνδέσεις. Τα δεδομένα μακροχρόνιων μετρήσεων του ρυθμού βροχόπτωσης μπορούν να είναι διαθέσιμα από τοπικές πηγές, αλλά μόνο με υψηλότερους χρόνους ολοκλήρωσης. Η παρούσα σύσταση παρέχει μια μέθοδο για την μετατροπή των στατιστικών στοιχείων του ρυθμού βροχόπτωσης με μεγαλύτερο χρόνο ολοκλήρωσης σε ρυθμό βροχόπτωσης στατιστικών στοιχείων με χρόνο ολοκλήρωσης ένα λεπτό.

Η Συνέλευση Ραδιοεπικοινωνιών της ITU, λαμβάνοντας υπόψη:

α) ότι οι πληροφορίες σχετικά με τα στατιστικά στοιχεία της έντασης της βροχόπτωσης είναι απαραίτητες για την πρόβλεψη της εξασθένησης και της σκέδασης που προκαλούνται από τις βροχοπτώσεις,

β) ότι οι πληροφορίες απαιτούνται για όλες τις τοποθεσίες του πλανήτη και για ένα ευρύ φάσμα πιθανοτήτων,

γ) ότι στατιστικά στοιχεία για την ένταση της βροχόπτωσης με χρόνο ολοκλήρωσης ένα λεπτό απαιτούνται για την πρόβλεψη της εξασθένησης και σκέδασης της βροχής σε επίγειες και δορυφορικές ζεύξεις,

δ) ότι μακροπρόθεσμες μετρήσεις του ρυθμού βροχόπτωσης μπορεί να είναι διαθέσιμες από τοπικές πηγές με χρόνο ολοκλήρωσης ενός λεπτού αλλά και με χρόνους ολοκλήρωσης μεγαλύτερους από ένα λεπτό,

ε) ότι η χρήση ενός μοντέλου για τη μετατροπή τοπικών μετρήσεων με χρόνους ολοκλήρωσης έως και μια ώρα έχει παρατηρηθεί ότι παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι η χρήση των παγκόσμιων ψηφιακών χαρτών και συνιστά τα παρακάτω:

- ⇒ ότι το μοντέλο που παρουσιάζεται παρακάτω θα πρέπει να χρησιμοποιείται για να λαμβάνεται ο ρυθμός βροχόπτωσης, R_p , που υπερβαίνεται για κάθε δεδομένο ποσοστό του μέσου έτους, p , και για οποιαδήποτε τοποθεσία (με χρόνο ολοκλήρωσης ένα λεπτό). Το μοντέλο αυτό πρέπει να εφαρμοστεί στα δεδομένα που παρέχονται στα ψηφιακά αρχεία ESARAIN_XXX_v5.TXT,
- ⇒ ότι για εύκολη αναφορά, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται τα Σχήματα 1 έως 6 του Παραρτήματος 2 της παρούσας σύστασης για την επιλογή του ρυθμού βροχόπτωσης, που υπερβαίνει το 0,01% του μέσου έτους. Τα στοιχεία αυτά προέκυψαν επίσης από το μοντέλο και τα δεδομένα που θα περιγραφούν παρακάτω,
- ⇒ ότι οι τοπικές μακροχρόνιες μετρήσεις του ρυθμού βροχόπτωσης με χρόνο ολοκλήρωσης ένα λεπτό θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν, εφόσον είναι διαθέσιμες,
- ⇒ ότι οι μακροχρόνιες μετρήσεις του ρυθμού βροχόπτωσης με μεγαλύτερους χρόνους ολοκλήρωσης θα πρέπει να χρησιμοποιούνται εάν είναι διαθέσιμες και το μοντέλο του Παραρτήματος 3 της παρούσας σύστασης να χρησιμοποιείται για τη μετατροπή σε ρυθμό βροχόπτωσης με χρόνο ολοκλήρωσης ενός λεπτού,
- ⇒ ότι οι τοπικές μετρήσεις, εάν χρησιμοποιούνται, να συλλέγονται για επαρκή περίοδο (συνήθως μεγαλύτερη από 3 έτη), ώστε να εξασφαλίζεται στατιστική σταθερότητα.

4.1.1 Μοντέλο για την εξαγωγή του ποσοστού βροχόπτωσης υπέρβασης για μια δεδομένη πιθανότητα του μέσου έτους και μια δεδομένη τοποθεσία

Τα αρχεία δεδομένων ESARAIN_PR6_v5.TXT, ESARAIN_MT_v5.TXT και ESARAIN_BETA_v5.TXT περιέχουν αντίστοιχα τις αριθμητικές τιμές για τις μεταβλητές Pr_6 , M_t και β , ενώ τα αρχεία δεδομένων ESARAINLAT_v5.TXT και ESARAINLON_v5.TXT περιέχουν το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος καθεμίας από τις καταχωρήσεις δεδομένων σε όλα τα άλλα αρχεία. Αυτά τα αρχεία δεδομένων προέκυψαν από δεδομένα 40 ετών από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσαίων Μετεωρολογικών Προβλέψεων (ECMWF) [14].

Βήμα 1: Εξαγωγή των μεταβλητών Pr_6 , M_t και β για τα τέσσερα σημεία που βρίσκονται πλησιέστερα σε γεωγραφικό πλάτος (Lat) και γεωγραφικό μήκος (Lon) στις γεωγραφικές συντεταγμένες της επιθυμητής θέσης. Το πλέγμα γεωγραφικού πλάτους

είναι από $+90^\circ$ B έως -90° N σε βήματα $1,125^\circ$. Αντίστοιχα, το πλέγμα γεωγραφικού μήκους είναι από 0° έως 360° σε βήματα $1,125^\circ$.

Βήμα 2: Από τις τιμές των P_{r6} , M_T και β στα τέσσερα σημεία του πλέγματος, λαμβάνονται οι τιμές $P_{r6}(Lat, Lon)$, $M_T(Lat, Lon)$ και $\beta(Lat, Lon)$ στην επιθυμητή γεωγραφική θέση με διγραμμική παρεμβολή, όπως περιγράφεται στη σύσταση ITU-R P.1144.

Βήμα 3: Μετατροπή των M_T και β σε M_c και M_s ως εξής:

$$M_c = \beta \cdot M_T \quad (4.1.1)$$

$$M_s = (1 - \beta) \cdot M_T \quad (4.1.2)$$

Βήμα 4: Προκύπτει η ποσοστιαία πιθανότητα βροχής σε ένα μέσο έτος, P_0 , από της εξής σχέση:

$$P_o(Lat, Lon) = P_{r6}(Lat, Lon) \cdot (1 - e^{-0.0079 \cdot \frac{M_s(Lat, Lon)}{P_{r6}(Lat, Lon)}}) \quad (4.1.3)$$

Εάν το P_{r6} είναι ίσο με μηδέν, η ποσοστιαία πιθανότητα βροχής σε ένα μέσο έτος και ο ρυθμός βροχόπτωσης υπέρβασης για οποιοδήποτε ποσοστό ενός μέσου έτους είναι ίσος με μηδέν. Στην περίπτωση αυτή, τα ακόλουθα βήματα είναι περιττά.

Βήμα 5: Το ποσοστό βροχόπτωσης υπέρβασης, R_p , για το $p\%$ του μέσου έτους, όπου $p \leq P_0$, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$R_p(Lat, Lon) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A} mm / h \quad (4.1.4)$$

όπου

$$A = a \cdot b \quad (4.1.5)$$

$$B = a + b \cdot \ln\left(\frac{P}{P_0(Lat, Lon)}\right) \quad (4.1.6)$$

$$C = \ln\left(\frac{P}{P_0(Lat, Lon)}\right) \quad (4.1.7)$$

και

$$a = 1.09 \quad (4.1.8)$$

$$b = \frac{(M_c(Lat, Lon) + M_s(Lat, Lon))}{21797 \cdot P_0} \quad (4.1.9)$$

$$c = 26.02 \cdot b \quad (4.1.10)$$

4.2 4.2 ITU-R P.838-3: Ειδικό μοντέλο εξασθένησης της βροχής για χρήση σε μεθόδους πρόβλεψης

Η Συνέλευση Ραδιοεπικοινωνιών της ITU, λαμβάνοντας υπόψη ότι υπάρχει ανάγκη υπολογισμού της εξασθένησης λόγω βροχής από τη γνώση του ποσοστού βροχόπτωσης, συνιστά να χρησιμοποιείται η παρακάτω διαδικασία.

Η ειδική εξασθένηση γ_R (dB/Km) λαμβάνεται από τον ρυθμό βροχόπτωσης R (mm/h) χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση νόμου-δύναμης:

$$\gamma_R = k \cdot R^a \quad (4.2.1)$$

Οι τιμές για τους συντελεστές k και a προσδιορίζονται ως συναρτήσεις της συχνότητας, f (GHz), στην περιοχή από 1 έως 1000 GHz, από τις ακόλουθες εξισώσεις, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί από την προσαρμογή καμπυλών σε συντελεστές νόμου δύναμης που προέρχονται από υπολογισμούς σκέδασης:

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^5 (a_j \cdot \exp[-(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j})^2]) + m_k \cdot \log_{10} f + c_k \quad (4.2.2)$$

$$a = \sum_{j=1}^5 (a_j \cdot \exp[-(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j})^2]) + m_a \cdot \log_{10} f + c_a \quad (4.2.3)$$

όπου:

f : συχνότητα (GHz)

k : είτε k_H είτε k_V

a : είτε a_H είτε a_V

Οι τιμές των σταθερών, δηλαδή του συντελεστή k_H για την οριζόντια πόλωση δίνονται στον Πίνακα 1 και του συντελεστή k_V για την κάθετη πόλωση στον Πίνακα 2. Στον Πίνακα 3 δίνονται οι τιμές των σταθερών για τον συντελεστή a_H για την οριζόντια πόλωση και στον Πίνακα 4 για το συντελεστή a_V για την κατακόρυφη πόλωση.

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5.33980	-0.10008	1.13098	-0.18961	0.71147
2	-0.35351	1.26970	0.45400		
3	-0.23789	0.86036	0.15354		
4	-0.94158	0.64552	0.16817		

Πίνακας 1: Συντελεστές για k_H [15].

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3.80595	0.56934	0.81061	-0.16398	0.63297
2	-3.44965	-0.22911	0.51059		
3	-0.39902	0.73042	0.11899		
4	0.50167	1.07319	0.27195		

Πίνακας 2: Συντελεστές για $\mathbf{k}_v$ [15].

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.14318	1.82442	-0.55187	0.67849	-1.95537
2	0.29591	0.77564	0.19822		
3	0.32177	0.63773	0.13164		
4	-5.37610	-0.96230	1.47828		
5	16.1721	-3.29980	3.43990		

Πίνακας 3: Συντελεστές για $\mathbf{a}_H$ [15].

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.07771	2.33840	-0.76284	-0.053739	0.83433
2	0.56727	0.95545	0.54039		
3	-0.20238	1.14520	0.26809		
4	-48.2991	0.791669	0.116226		
5	48.5833	0.791459	0.116479		

Πίνακας 4: Συντελεστές για $\mathbf{a}_v$ [15].

Για γραμμική και κυκλική πόλωση και για όλες τις γεωμετρίες διαδρομής, οι συντελεστές της εξίσωσης (4.2.1) μπορούν να υπολογιστούν από τις τιμές που δίνονται από τις εξισώσεις (4.2.2) και (4.2.3) χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εξισώσεις:

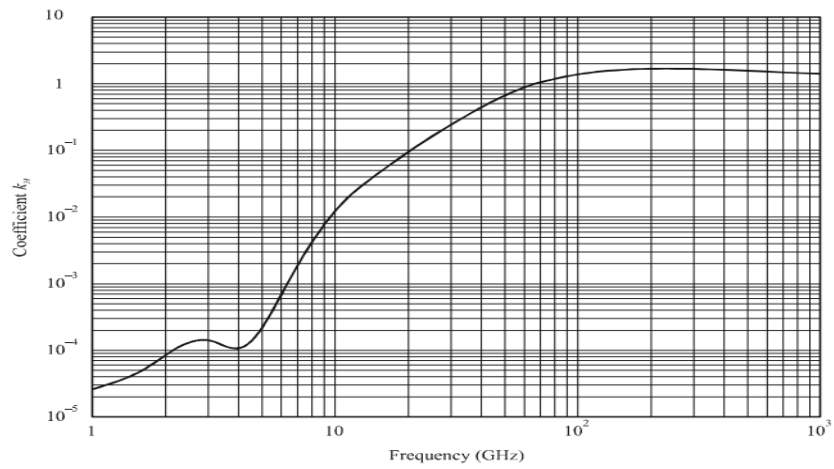
$$k = k_H + k_V + (k_H - k_V) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos 2\tau / 2 \quad (4.2.4)$$

$$A_{20} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{2} \cdot 10^{\frac{SNR_{cs}}{10}}\right) - 10 \cdot \log\left(1 + \frac{1}{2} \cdot 10^{\frac{SNR_{cs} - A'_1 / \cos \varphi_1}{10}}\right) - 10 \cdot \log\left(2^{C_{th}} + \frac{1}{2} \cdot 10^{\frac{SNR_{cs} - A'_1 / \cos \varphi_1}{10}}\right)$$

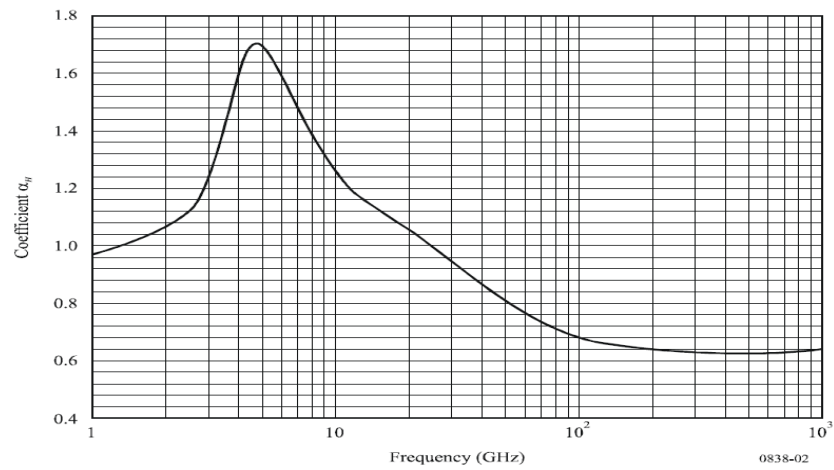
$$\alpha = [k_H \cdot a_H + k_V \cdot a_V + (k_H \cdot a_H - k_V \cdot a_V) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos 2\tau / 2k \quad (4.2.5)$$

όπου θ είναι η γωνία ανύψωσης της διαδρομής και τ είναι η γωνία κλίσης της πόλωσης σε σχέση με την οριζόντια (45 για κυκλική πόλωση). Για γρήγορη αναφορά, οι

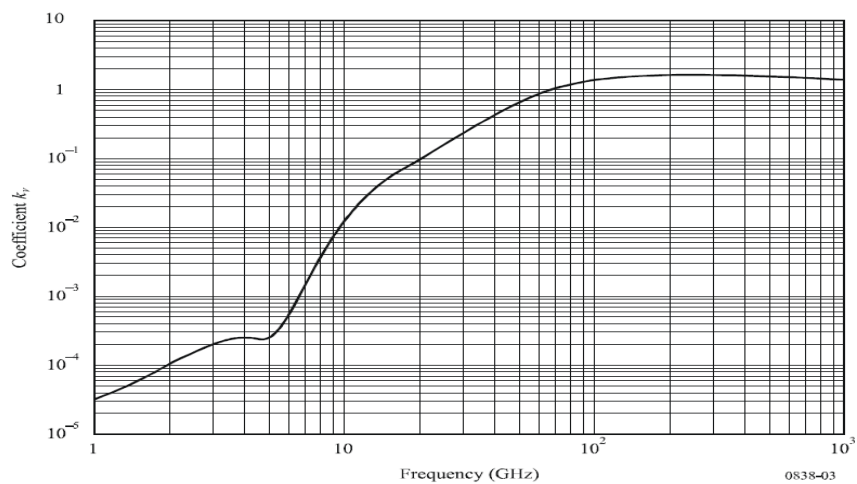
συντελεστές k και a παρουσιάζονται γραφικά στα Σχήματα 4.1 έως 4.4 και ο Πίνακας 5 παραθέτει αριθμητικές τιμές για τους συντελεστές σε δεδομένες συχνότητες.



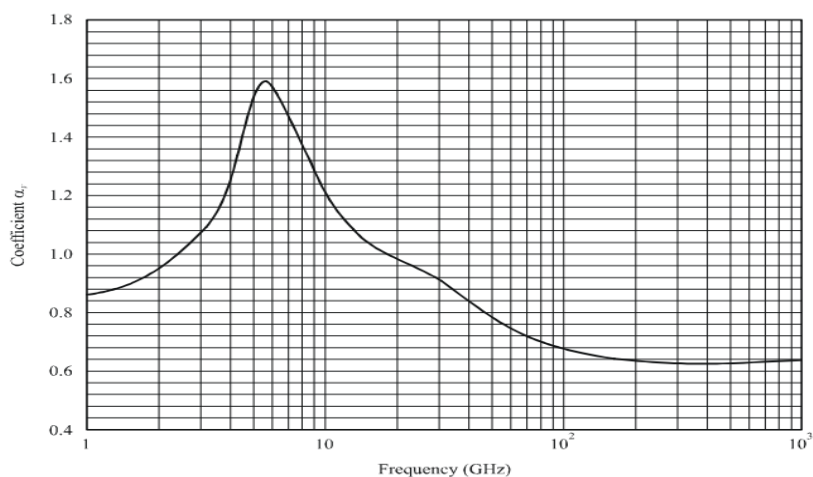
Σχήμα 4.1: Συντελεστής k για οριζόντια πόλωση [15].



Σχήμα 4.2: Συντελεστής a για οριζόντια πόλωση [15].



Σχήμα 4.3: Συντελεστής k για κάθετη πόλωση [15].



Σχήμα 4.4: Συντελεστής α για κάθετη πόλωση [15].

Συχνότητα (GHz)	k_H	a_H	k_V	a_V
10	0.01217	1.2571	0.01129	1.2156
20	0.9164	1.0568	0.09611	0.9847
30	0.2403	0.9485	0.2291	0.9129
40	0.4431	0.8673	0.4274	0.8421
50	0.6600	0.8084	0.6472	0.7871

Πίνακας 5: Συντελεστές εξαρτώμενοι από τη συχνότητα για την εκτίμηση της ειδικής εξασθένισης της βροχής [15].

Σημειώνεται ότι οι παραπάνω συντελεστές των συγκεκριμένων συχνοτήτων χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις που παρουσιάζονται παρακάτω.

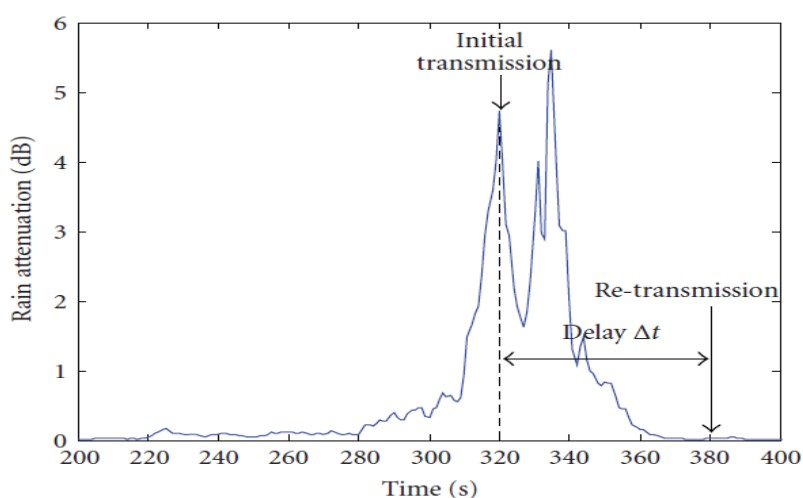
4.3 Διαφορισμός χρόνου (Time diversity)

Στο παρελθόν έχουν διερευνηθεί διεξοδικά διάφορα σχήματα διαφορισμού (diversity schemes) για τον μετριασμό της εξασθένισης λόγω βροχής σε σταθερά συστήματα επικοινωνιών ή συστήματα ευρυεκπομπής που λειτουργούν πάνω από τα 10 GHz. Τα σχήματα αυτά προσφέρουν σημαντική βελτίωση των επιδόσεων, ιδίως αν ληφθεί υπόψη η πρόσφατη τάση των εμπορικών επίγειων δικτύων να μεταναστεύουν σε ζώνες υψηλότερων συχνοτήτων λόγω φασματικής ή/και τροχιακής συμφόρησης: πρώτα, από τη ζώνη συχνοτήτων C στη ζώνη συχνοτήτων Ku και πιο πρόσφατα, από

τη Ku στη ζώνη συχνοτήτων Ka ή ακόμη και στη ζώνη συχνοτήτων EHF. Μία σημαντική τεχνική από τις καθιερωμένες είναι ο διαφορισμός χρόνου (TD – Time Diversity).

Ο διαφορισμός χρόνου (TD) είναι μια λιγότερο μελετημένη εναλλακτική λύση διαφορισμού για επίγεια συστήματα. Βασικά, συνίσταται στην αναμετάδοση της αλλοιωμένης πληροφορίας σε χρονικές στιγμές που το κανάλι αναμένεται να είναι πιο ευνοϊκό, δηλαδή σε χρονικές αποστάσεις που υπερβαίνουν το χρόνο συνοχής του καναλιού. Η βασική αρχή της τεχνικής TD απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5. Στην πραγματικότητα, μοιάζει με την τεχνική άμβλυνσης διαλείψεων (FMT-Fade Mitigation Technique) του αυτόματου αιτήματος επανάληψης (ARQ-Automatic Repeat Request) που εφαρμόζεται στο στρώμα 2, η οποία εμπίπτει στη γενική κατηγορία της διόρθωσης σφαλμάτων. Η διαφορά μεταξύ των δύο τεχνικών είναι ότι η ARQ χαρακτηρίζεται από μια σταθερή ή τυχαία περίοδο επαναμετάδοσης, ενώ η TD επαναμεταδίδει την πληροφορία αφού εκτιμήσει τη διάρκεια του δυσμενούς φαινομένου διάδοσης.

Είναι σαφές ότι η απόδοση της τεχνικής TD συνδέεται στενά με τη χρονική περίοδο που επιλέγεται για την αναμετάδοση, η οποία κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα έως αρκετές ώρες. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματά της σε σύγκριση με άλλες τεχνικές διαφορισμού είναι ότι η TD δεν απαιτεί πρόσθετο εξοπλισμό ή περίπλοκες διαδικασίες συγχρονισμού, δεδομένου ότι περιλαμβάνει μόνο μία επίγεια ζεύξη και μία μόνο μονάδα λήψης. Αυτό καθιστά την επιλογή TD οικονομικά αποδοτική. Ωστόσο, η εφαρμογή της τεχνικής TD περιορίζεται σε εφαρμογές με ανοχή στην καθυστέρηση, όπως το video on demand ή τα πολυμέσα και η μεταφορά δεδομένων και φαίνεται ιδιαίτερα ελκυστική για υπηρεσίες ραδιοτηλεοπτικών μεταδόσεων.



Σχήμα

Εφαρμογή της τεχνικής TD [16].

4.5:

4.3.1 Προτεινόμενο μοντέλο πρόβλεψης για την τεχνική TD

Δεδομένου ότι υπάρχουν μόνο λίγα παρόμοια μοντέλα στην βιβλιογραφία, τα οποία συνήθως προέρχονται από μετρήσεις σε συγκεκριμένες περιοχές, η παρούσα εργασία προτείνει ένα φυσικό μοντέλο πρόβλεψης για την εκτίμηση της απόδοσης του TD. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στην υπόθεση ότι τα κοινά στατιστικά στοιχεία της εξασθένησης της βροχής τόσο στην αρχική όσο και στην αναμετάδοση ακολουθούν την λογαριθμοκανονική κατανομή. Στο τέλος της ενότητας 4.3, το μοντέλο πρόβλεψης δοκιμάζεται με πειραματικά δεδομένα TD, τα οποία μετρήθηκαν σε περιοχές της Ελλάδας (Αθήνα, Ιωάννινα, Κέρκυρα, Χανιά) και συζητούνται οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοσή του.

Μια από τις πρώτες μετρήσεις TD πραγματοποιήθηκε στην περιοχή του ισημερινού της Μαλαισίας με τη χρήση δορυφορικού δέκτη φάρου στα 12 GHz για την καταγραφή δεδομένων από γεωστατικό δορυφόρο MEASAT. Εκτός από την παρουσίαση της ανάλυσης των δεδομένων των 20 μηνών, αναπτύχθηκε ένα εμπειρικό εκθετικό μοντέλο για την προσαρμογή της αθροιστικής κατανομής του TD [17]. Η κατανομή αυτή ορίζεται μέσω της πιθανότητας υπέρβασης:

$$\Pr\{A_{TD}(\Delta t) > a\} = 1 - \Pr\{\min(A(t), A) \leq a\} \quad (4.3.1)$$

όπου $A(t)$ είναι το δείγμα της στοχαστικής διαδικασίας εξασθένησης της βροχής τη χρονική στιγμή t , $A_{TD}(\Delta t)$ δηλώνει την εξασθένηση στην οποία υπόκειται ένα σύστημα TD με χρόνο αναμετάδοσης Δt και a είναι το περιθώριο εξασθένησης. Όλες οι ποσότητες εξασθένησης εκφράζονται σε dB. Η σχέση μεταξύ του κέρδους TD, της χρονικής καθυστέρησης και του ποσοστού χρόνου προσεγγίστηκε με μια συνάρτηση παρόμοια με αυτή που προτείνεται από τη σύσταση ITU-R [9, σελίδα 618] για την πρόβλεψη της εξασθένησης βροχής σε μία τοποθεσία. Σημειώστε ότι το κέρδος TD για το ποσοστό χρόνου $p\%$ δίνεται από τη διαφορά:

$$G_{TD}(\Delta t; p\%) = A_{TD}(\Delta t = 0; p\%) - A_{TD}(\Delta t \neq 0; p\%) \quad (4.3.2)$$

Για την μοντελοποίηση των κοινών στατιστικών στοιχείων δύο τυχαίων μεταβλητών εξασθένησης $A(t)$, $A(t + \Delta t)$ που χωρίζονται από μια χρονική καθυστέρηση Δt θεωρήθηκε διμεταβλητή λογαριθμοκανονική κατανομή. Η συσχέτιση μεταξύ αυτών των τυχαίων μεταβλητών στο πεδίο του χρόνου θεωρείται ότι ακολουθεί την ίδια κατανομή με την αντίστοιχη χωρική συνάρτηση συσχέτισης που χρησιμοποιείται στην τεχνική διαφορισμού χώρου (SD - Site Diversity) που θα αναλυθεί παρακάτω. Αυτό

λαμβάνεται υπόψη με την απλή αντικατάσταση της απόστασης διαχωρισμού χώρου με την καθυστέρηση TD.

Για λόγους απλούστευσης του συμβολισμού, οι τυχαίες μεταβλητές εξασθένησης της βροχής που αντιστοιχούν στην πρώτη και τη δεύτερη μετάδοση του ίδιου σήματος συμβολίζονται στη συνέχεια με A_1 και A_2 , αντίστοιχα. Το σημείο εκκίνησης της προτεινόμενης προσέγγισης είναι η παραδοχή ότι τα δύο δείγματα $A_1 = A(t)$ και $A_2 = A(t + \Delta t)$ της τυχαίας διαδικασίας εξασθένησης της βροχής ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή. Με βάση αυτή την υπόθεση, μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι η πιθανότητα υπέρβασης που δίνεται από την (4.3.1) μπορεί επίσης να προσδιοριστεί από τη σχέση

$$P_{TD} = \Pr(A_1 > a, A_2 > a) = \int_a^\infty \int_a^\infty P_{A_1 A_2}(A_1, A_2) dA_1 dA_2 \quad (4.3.3)$$

όπου $p_{A_1 A_2}(A_1, A_2)$ είναι η κοινή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf- probability density function) των $A(t)$ και $A(t+\Delta t)$. Η παραπάνω κοινή pdf θεωρείται ότι ακολουθεί τη διμεταβλητή λογαριθμοκανονική κατανομή. Η πιθανότητα υπέρβασης μιας μεμονωμένης μετάδοσης είναι (θέτοντας για λόγους απλότητας $A = A(t)$):

$$\Pr(A_1 > a) = \int_a^\infty p_A(A) dA = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\ln a - \ln A_m}{\sqrt{2} S_a}\right) \quad (4.3.4)$$

όπου $p_A(A)$ είναι η λογαριθμοκανονική pdf, A_m και S_a είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της αντίστοιχης κανονικής τυχαίας μεταβλητής $\ln A$ και $\operatorname{erfc}(x)$ είναι η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος (4.3.4). Με βάση το μετασχηματισμό:

$$U = \frac{\ln A - \ln A_m}{S_a} \quad (4.3.5)$$

η πιθανότητα υπέρβασης που δίνεται από την (4.3.4) εκφράζεται ως συνάρτηση της κανονικοποιημένης εξασθένησης U :

$$\Pr(U > u) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u}{\sqrt{2}}\right) \quad (4.3.6)$$

Υποθέτοντας ότι είναι διαθέσιμες μακροχρόνιες μετρήσεις εξασθένησης της βροχής με τη μορφή ζευγών πιθανοτήτων εξασθένησης, (A_i, P_i) , $i = 1, \dots, N$, όπου N είναι ο αριθμός των διαθέσιμων ζευγών δεδομένων, οι στατιστικές παράμετροι A_m και

S_a μπορούν να εκτιμηθούν αντιστρέφοντας πρώτα την (4.3.6) για να προκύψει η παρακάτω σχέση:

$$U_i = \sqrt{2} \cdot \operatorname{erfc}^{-1}(2 \cdot P_i), i = 1, 2, \dots, N \quad (4.3.7)$$

Δεδομένου ότι οι U_i ικανοποιούν επίσης την (4.3.5), προκύπτει το ακόλουθο σύνολο εξισώσεων:

$$U_i = C_1 \cdot Z_i + C_2, i = 1, 2, \dots, N \quad (4.3.8)$$

όπου

$$\begin{aligned} Z_i &= \ln A_i \\ C_1 &= S_a^{-1} \\ C_2 &= -\ln(A_m / S_a) \end{aligned} \quad (4.3.9)$$

Δεδομένου ότι οι U_i και Z_i συνδέονται μέσω της γραμμικής σχέσης (4.3.8), μια διαδικασία παλινδρόμησης ελαχίστων τετραγώνων μπορεί εύκολα να οδηγήσει στην εκτίμηση των συντελεστών C_1 και C_2 και, στη συνέχεια, των A_m και S_a . Δεδομένου ότι για την εξαγωγή των (4.3.4) και (4.3.6) υιοθετείται η λογαριθμοκανονική κατανομή, στους υπολογισμούς λαμβάνονται υπόψη μόνο τιμές του A_i υψηλότερες από ένα ελάχιστο όριο 0,5 dB. Επίσης, σε περίπτωση που δεν υπάρχουν διαθέσιμες τοπικές μετρήσεις, οι στατιστικές παράμετροι A_m και S_a μπορούν να υπολογιστούν εφαρμόζοντας τη διαδικασία που συνοψίζεται στις (4.3.6)-(4.3.9) στο μοντέλο εξασθένησης βροχής της σύστασης ITU-R [9, σελ. 618].

Επιστρέφοντας στη διμεταβλητή περίπτωση και υιοθετώντας για τις δύο τυχαίες μεταβλητές A_1 και A_2 το μετασχηματισμό (4.3.5), προκύπτουν δύο κανονικές τυχαίες μεταβλητές, δηλαδή οι U_1 και U_2 , η καθεμία με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση ίση με 1. Η κοινή τους pdf δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P_{U_1 U_2}(U_1, U_2) = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{1 - \rho_n^2(\Delta t)}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2 \cdot (1 - \rho_n^2(\Delta t))} \cdot (U_1^2 + U_2^2 - 2 \cdot \rho_n(\Delta t) \cdot U_1 \cdot U_2)\right\} \quad (4.3.10)$$

όπου ο κανονικοποιημένος συντελεστής χρονικής συσχέτισης ρ_n ορίζεται ως:

$$\rho_n(\Delta t) = \frac{\exp(S_a^2 \cdot \exp(-d_A \cdot |\Delta t|)) - 1}{\exp(S_a^2) - 1} \quad (4.3.11)$$

Θα πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι η κρίσιμη εξάρτηση της $p_{U_1 U_2}(U_1, U_2)$ και των επακόλουθων αποτελεσμάτων από το Δt εκφράζεται από το συντελεστή συσχέτισης, ο οποίος είναι συνάρτηση του Δt .

Η παράμετρος d_A [s^{-1}] είναι η δυναμική παράμετρος της εξασθένησης της βροχής (αναφέρεται επίσης ως beta στη βιβλιογραφία) που περιγράφει τη χρονική μεταβολή της διαδικασίας εξασθένησης της βροχής.

Με βάση το θεώρημα του Bayes, η (4.3.10) μπορεί να εκφραστεί ως προς την οριακή και την υπό συνθήκη pdf της ως εξής:

$$p_{U_1 U_2}(U_1, U_2) = p_{U_2}(U_2) \cdot p_{U_1/U_2}(U_1, U_2) \quad (4.3.12)$$

όπου

$$p_{U_1/U_2}(U_1, U_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot (1 - \rho_n^2(\Delta t))}} \cdot \exp\left\{-\frac{(U_1 - \rho_n(\Delta t) \cdot U_2)^2}{2 \cdot (1 - \rho_n^2(\Delta t))}\right\} \quad (4.3.13)$$

και $p_{U_2}(U_2)$ είναι η κανονική pdf. Με την αντικατάσταση των (4.3.12), (4.3.13) στην (4.3.3), προκύπτει η τελική έκφραση για την κοινή πιθανότητα υπέρβασης των δύο τυχαίων μεταβλητών εξασθένησης της βροχής που διαχωρίζονται χρονικά κατά Δt :

$$P_{TD} = \frac{1}{2} \cdot \int_u^\infty p_{U_2}(U) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{u - \rho_n(\Delta t) \cdot U}{\sqrt{(1 - \rho_n^2(\Delta t))}}\right) dU \quad (4.3.14)$$

4.3.2 Προσομοίωση για την τεχνική διαφορισμού χρόνου (time diversity)

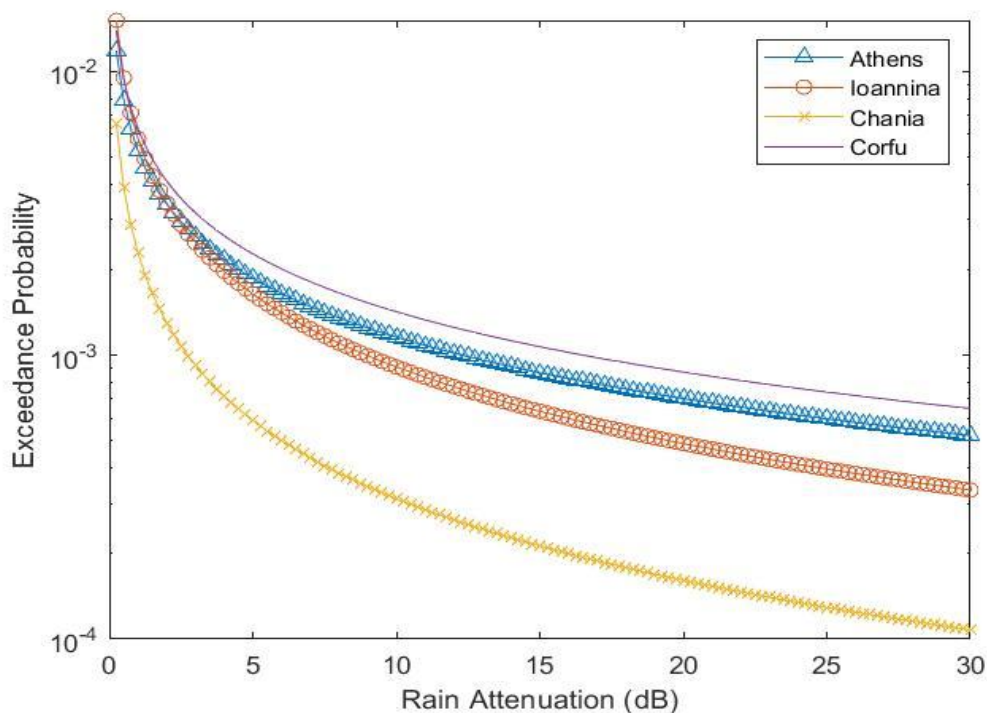
Σε αυτή την ενότητα γίνεται μια προσπάθεια επικύρωσης των αποτελεσμάτων της τεχνικής διαφορισμού χρόνου και του στατιστικού μοντέλου της, το οποίο βασίζεται στη διμεταβλητή λογαριθμοκανονική κατανομή. Το μοντέλο αυτό πραγματοποιήθηκε για μια ποικιλία δεδομένων μέτρησης που σχετίζονται με διάφορες κλιματικές ζώνες, διαφορετικές συχνότητες και διαφορετικά μήκη ζεύξεων για επίγειες ζεύξεις. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα ρυθμού βροχόπτωσης σε ελληνικές πόλεις όπως η Αθήνα, τα Ιωάννινα, η Κέρκυρα και τα Χανιά. Τα δεδομένα αυτά ανακτήθηκαν εφαρμόζοντας την σύσταση της ITU-R P.837-6 σε περιβάλλον MATLAB που αφορά το μοντέλο διάδοσης για τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.1.

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν οι εξής συντεταγμένες για τις τέσσερις ελληνικές πόλεις, οι οποίες αντικατοπτρίζουν την θέση ενός εικονικού επίγειου σταθμού βάσης σε κάθε πόλη:

Πόλη	Γεωγραφικό Μήκος	Γεωγραφικό Πλάτος
Αθήνα	37.983917°	23.72750°
Ιωάννινα	39.66398°	20.85228°
Κέρκυρα	35.51306°	24.01806°
Χανιά	39.607703°	19.914856°

Για την περίπτωση της τεχνικής διαφορισμού χρόνου μελετήθηκαν οι συχνότητες 20 GHz, 30 GHz, 40 GHz και 50 GHz, που αντιστοιχούν στις ζώνες συχνοτήτων K, Ka και V. Η προσομοίωση επίσης πραγματοποιήθηκε για μήκη ζεύξεων 1 km, 2 km και 3 km και για χρονικά διαστήματα 10, 30, 60 και 300 δευτερολέπτων. Τέλος, η δυναμική παράμετρος της εξασθένησης της βροχής d_A πάρθηκε ίση με 10^{-4} .

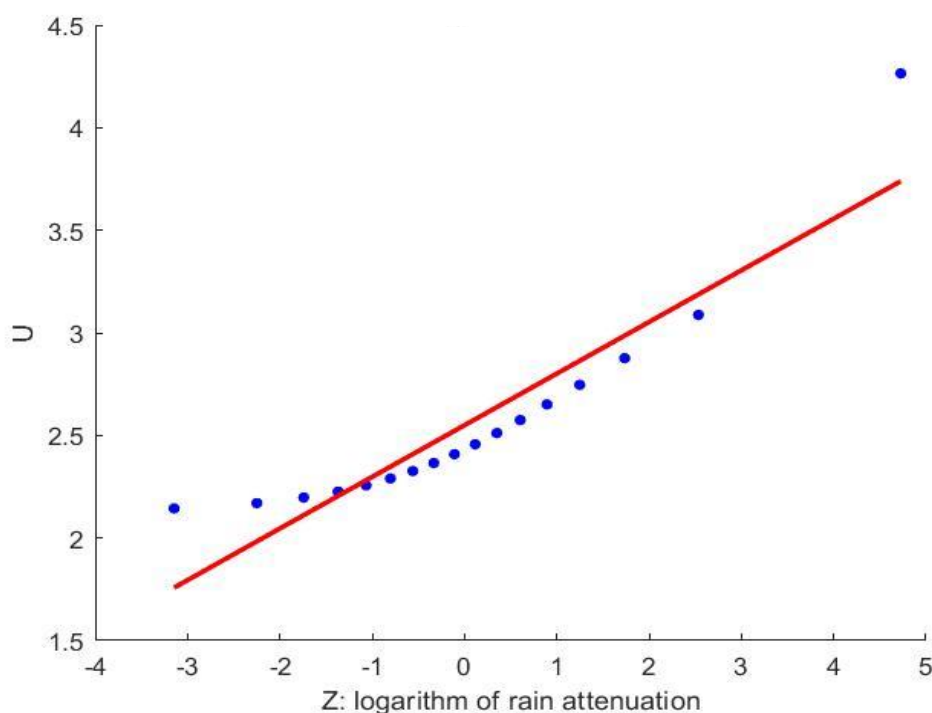
Στο παρακάτω Σχήμα φαίνεται η διαφοροποίηση των ελληνικών πόλεων που μελετήθηκαν, σχετικά με τον ρυθμό βροχόπτωσης λόγω ότι ανήκουν σε διαφορετικές γεωγραφικές συντεταγμένες και κλιματικές ζώνες.



Σχήμα 4.6: Κλιματική διαφορά μεταξύ των ελληνικών πόλεων.

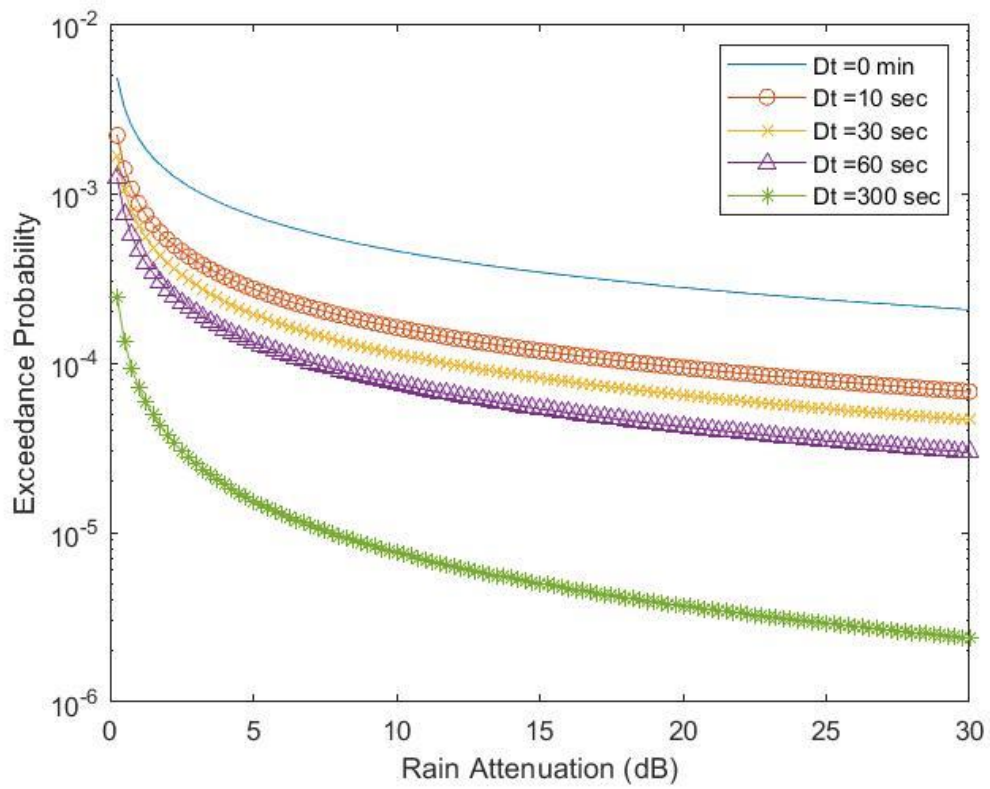
Από Σχήμα 4.6 συμπεραίνουμε ότι όσο η εξασθένηση λόγω βροχής αυξάνεται, η πιθανότητα υπέρβασης λόγω βροχόπτωσης είναι μεγαλύτερη στην Κέρκυρα, μικρότερη στην Αθήνα και στα Ιωάννινα και πολύ μικρότερη στα Χανιά.

Στη συνέχεια, όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.3.1 από τις σχέσεις (4.3.8) και (4.3.9) γίνεται γραμμική προσαρμογή με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων μεταξύ της κανονικοποιημένης εξασθένησης U και του λογαρίθμου της εξασθένησης λόγω βροχής Z . Παρακάτω φαίνεται η επιτυχημένη γραμμική προσαρμογή των δεδομένων που συλλέχθηκαν εφαρμόζοντας την οδηγία ITU-R P.837-8 για την πόλη των Χανίων.

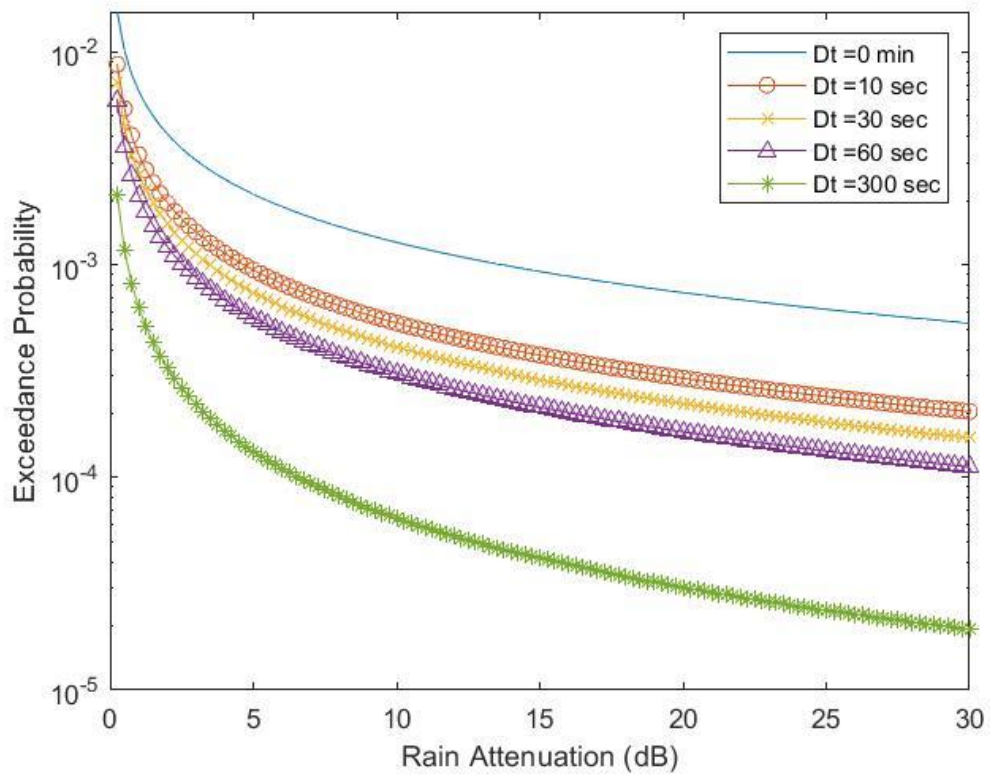


Σχήμα 4.7: Γραμμική προσαρμογή δεδομένων (Z,U) για την πόλη των Χανίων.

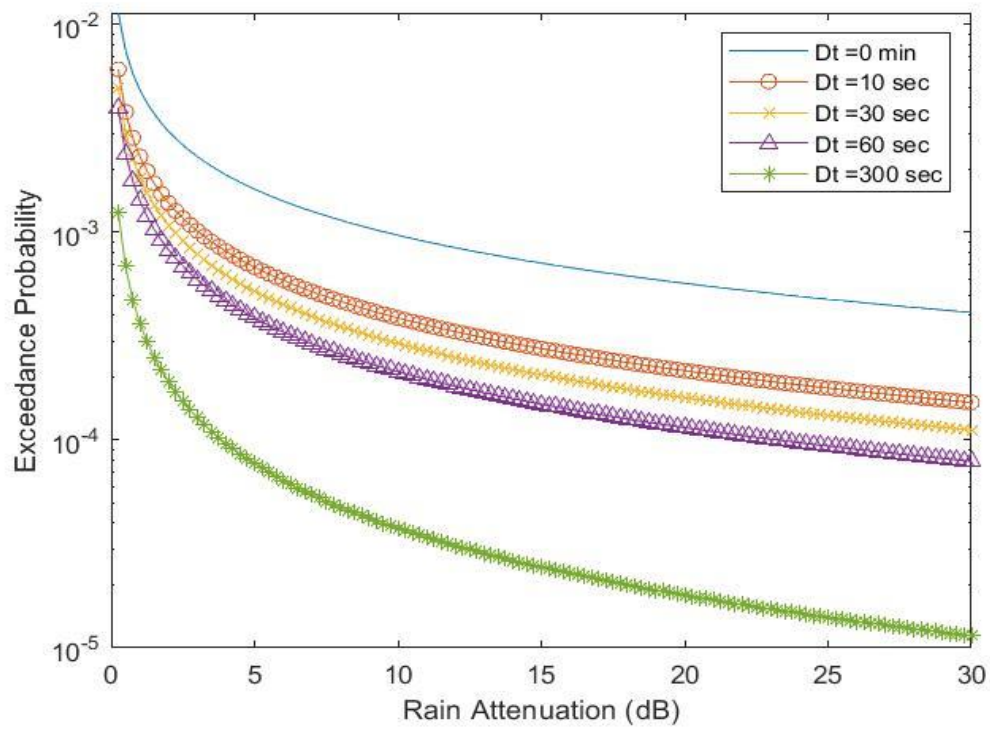
Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά Σχήματα στα οποία παρουσιάζονται οι διαφορές ανάμεσα στις διαφορετικές τιμές χρονικής καθυστέρησης κατά τις οποίες ένας σταθμός βάσης επανεκπέμπει το σήμα στον δέκτη. Οι διαφορετικές αυτές τιμές παρουσιάζουν μικρότερη συσχέτιση μεταξύ τους και για αυτό το λόγο η πιθανότητα υπέρβασης μειώνεται. Επίσης, στα παρακάτω Σχήματα χρησιμοποιούνται διαφορετικές τιμές συχνότητας και μήκους ζεύξης και θεωρούμε ότι έχουμε κάθετη πόλωση και μηδενική γωνία ανύψωσης.



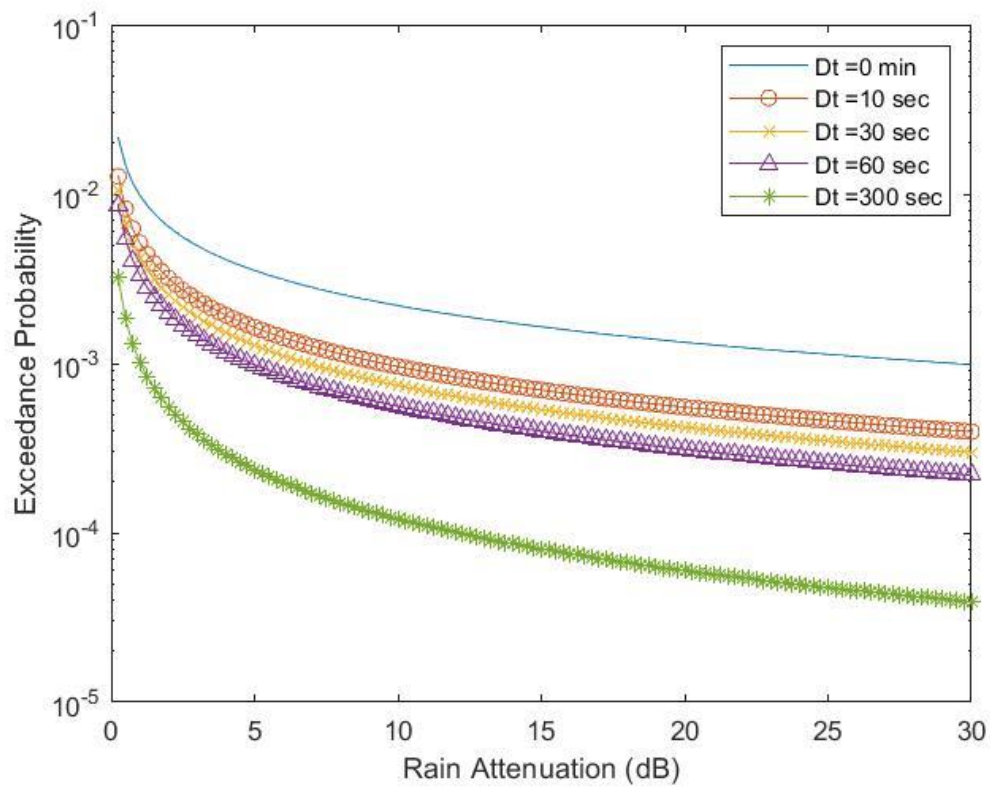
Σχήμα 4.8: Time Diversity για Αθήνα, συχνότητα 20 GHz, μήκος ζεύξης 1 km.



Σχήμα 4.9: Time Diversity για Αθήνα, συχνότητα 50 GHz, μήκος ζεύξης 1 km.



Σχήμα 4.10: Time Diversity για Αθήνα, συχνότητα 40 GHz, μήκος ζεύξης 1 km.



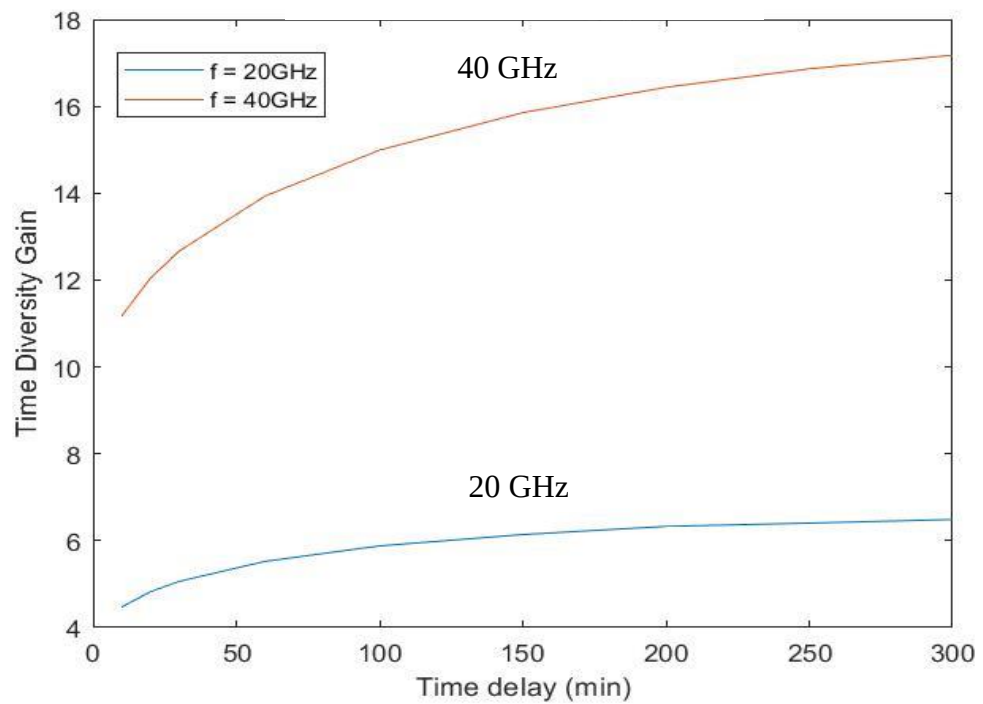
Σχήμα 4.11: Time Diversity για Αθήνα, συχνότητα 40 GHz, μήκος ζεύξης 3 km.

Από τα παραπάνω Σχήματα συμπεραίνουμε ότι όσο αυξάνεται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το σύστημά μας επανεκπέμπει το σήμα στο δέκτη, τόσο μειώνεται η πιθανότητα υπέρβασης λόγω βροχόπτωσης όσο επίσης αυξάνεται το κατώφλι της εξασθένησης λόγω βροχής. Αυτό συμβαίνει γιατί όσο αυξάνεται αυτό το χρονικό διάστημα επανεκπομπής τόσο μειώνεται ο συντελεστής συσχέτισης που υπολογίζεται από τη σχέση (4.3.11) και αυτό επηρεάζει τον συνολικό υπολογισμό της πιθανότητας υπέρβασης. Συγκεκριμένα, στην Αθήνα για συχνότητα ίση με 20 GHz και σταθερό χρονικό διάστημα επανεκπομπής ίσο με 1 λεπτό, η πιθανότητα υπέρβασης από $4.57 \cdot 10^{-4}$ μειώνεται σε $7.51 \cdot 10^{-5}$, για εξασθένηση λόγω βροχής ίση με 10 dB.

Επίσης, όσο αυξάνεται η συχνότητα από τα 20 GHz στα 50 GHz, καθώς και το μήκος της ζεύξης από 1 km στα 3 km, παρατηρείται ότι τόσο αυξάνεται η πιθανότητα υπέρβασης λόγω βροχόπτωσης. Για εξασθένηση λόγω βροχόπτωσης ίση με 10 dB, για συχνότητα ίση με 50 GHz και χρονικό διάστημα επανεκπομπής ίσο με 1 λεπτό, έχουμε πιθανότητα υπέρβασης ίση με $3.08 \cdot 10^{-4}$. Στη συνέχεια, αυξάνοντας το μήκος της ζεύξης σε 3 km και διατηρώντας σταθερά τα προηγούμενα μεγέθη παρατηρούμε το ίδιο, αφού η πιθανότητα υπέρβασης από $2.13 \cdot 10^{-4}$ αυξάνεται σε $5.58 \cdot 10^{-4}$. Αυτό γίνεται επειδή σε μεγαλύτερες συχνότητες η εξασθένηση λόγω των παραγόντων της ατμόσφαιρας είναι πιο έντονη, λόγω του φαινομένου της σκέδασης στα σωματίδια της ατμόσφαιρας τα οποία γίνονται σε μέγεθος όλο και πιο συγκρίσιμα με το μήκος κύματος με το οποίο εκπέμπεται το σήμα. Ακόμη, όσο αυξάνεται το μήκος της ζεύξης αυξάνονται και οι απώλειες ελευθέρου χώρου.

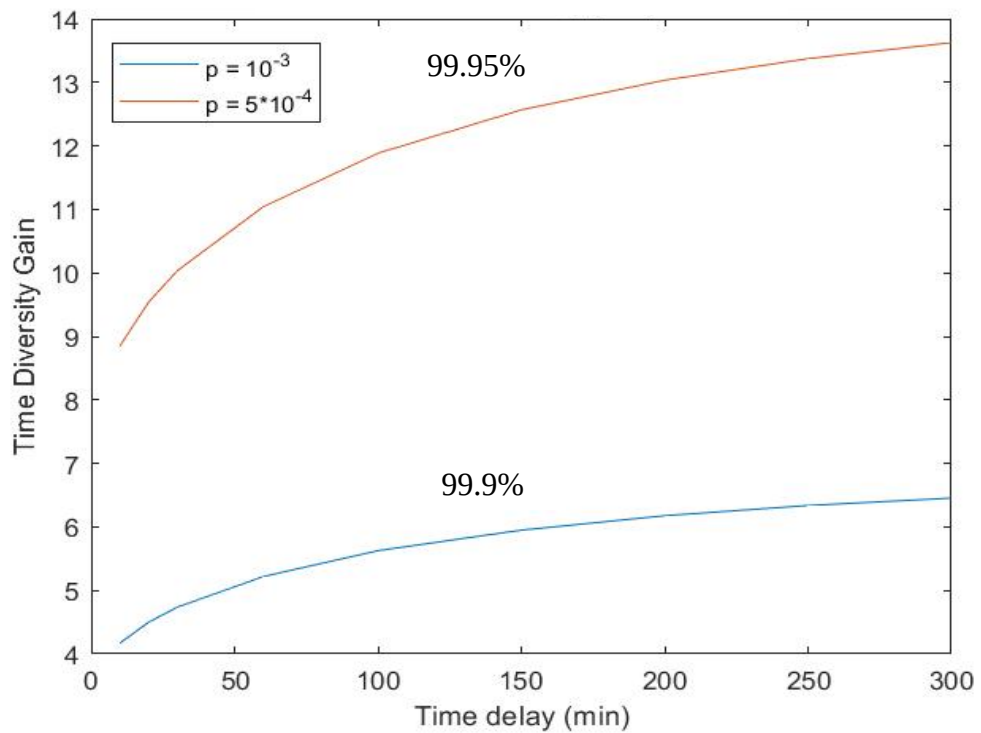
Τέλος, η αλλαγή των κλιματολογικών συνθηκών με την παράλληλη χρησιμοποίηση της τεχνικής διαφορισμού time diversity δεν έχει κάποια σημαντική διαφοροποίηση σε σχέση με την απλή περίπτωση στην οποία δεν χρησιμοποιείται κάποια τεχνική διαφορισμού.

Παρακάτω εξετάζεται το κέρδος διαφορισμού που προκύπτει, χρησιμοποιώντας την τεχνική διαφορισμού χρόνου, όπως αυτό υπολογίζεται μέσω της σχέσης (4.3.2). Το κέρδος διαφορισμού για τις συχνότητες 20 GHz και 40 GHz για διαθεσιμότητα στο 99.96% για την πόλη των Ιωαννίνων εμφανίζεται στο Σχήμα 4.12:



Σχήμα 4.12: Κέρδος διαφορισμού για τις συχνότητες 20 GHz και 40 GHz (Ιωάννινα).

Στο Σχήμα 4.13 η συχνότητα διατηρείται σταθερή στα 40 GHz αλλά μεταβάλλεται η πιθανότητα διαθεσιμότητας από 99.95% σε 99.9%:



Σχήμα 4.13: Κέρδος διαφορισμού για πιθανότητες διαθεσιμότητας 99.9% και 99.95%.

Από τα παραπάνω Σχήματα συμπεραίνουμε ότι όσο αυξάνεται το χρονικό διάστημα επανεκπομπής του σήματος από τον πομπό, τόσο βελτιώνεται το κέρδος διαφορισμού μέχρι ενός σημείου κορεσμού. Περαιτέρω χρονική καθυστέρηση από αυτό το σημείο δεν βελτιώνει ιδιαίτερα την απόδοση του συστήματος. Επίσης, παρατηρούμε ότι για μεγαλύτερες συχνότητες, δηλαδή από 20 GHz και πάνω, έχουμε και μεγαλύτερο κέρδος διαφορισμού. Δηλαδή με την τεχνική διαφορισμού χρόνου έχουμε βελτίωση της απόδοσης του συστήματος όσο χρησιμοποιούνται μεγαλύτερες συχνότητες. Τέλος, μεγαλύτερο κέρδος παρατηρείται για μεγαλύτερη πιθανότητα διαθεσιμότητας του συστήματος.

4.4 Τεχνική Διαφορισμού Χώρου (Site Diversity)

Ο κυρίαρχος παράγοντας διάδοσης που επηρεάζει την αξιοπιστία των σταθερών κυψελωτών συστημάτων που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 20 GHz είναι η εξασθένηση της βροχής. Ο διαφορισμός χώρου είναι μια διαθέσιμη μέθοδος για τη μείωση του χρόνου αποκοπής λόγω της βροχής για αυτά τα συστήματα. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται μια αναλυτική διαδικασία για την αξιολόγηση της απόδοσης διακοπής λειτουργίας ενός συστήματος διαφορισμού χώρου. Εξετάζεται επίσης η εξάρτηση του κέρδους διαφορισμού χώρου από τις κλιματικές συνθήκες και εξάγονται ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα.

Υπάρχει ολοένα και αυξανόμενο ενδιαφέρον για την παροχή υπηρεσιών ευρείας ζώνης μέσω τοπικών δικτύων πρόσβασης σε μεμονωμένους χρήστες. Οι λύσεις ραδιο-συχνοτήτων στη μικροκυματική ζώνη θεωρούνται ως τα βέλτιστα συστήματα παροχής αυτών των υπηρεσιών. Ονομάζονται συστήματα ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης (BWA – Broad-Band Wireless Access) ή τοπικά κατανεμημένα συστήματα πολλαπλών σημείων. Σχεδιάζονται για την παροχή υπηρεσιών μετάδοσης (πολυμέσων, βίντεο, δίκτυο) από έναν κεντρικό πομπό σε μεμονωμένους συνδρομητές εντός της περιοχής της κυψέλης του. Οι ζώνες συχνοτήτων που κατανέμονται από την ITU-R και την CEPT είναι συνήθως άνω των 20 GHz. Σε αυτές τις ζώνες, η εξασθένηση της βροχής είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας διάδοσης που καθορίζει τη διαθεσιμότητα του συστήματος. Πιο πρόσφατα, έχει προταθεί η τεχνική διαφορισμού χώρου για τη μείωση του χρόνου διακοπής λόγω του παραπάνω λόγου. Σύμφωνα με αυτή την τεχνική μετριασμού της εξασθένησης, κάθε χρήστης συνδέεται με δύο ή περισσότερους σταθμούς βάσης σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή και έχει τη δυνατότητα να μεταβαίνει στο λιγότερο εξασθενημένο μονοπάτι. Η προσοχή σε αυτή την ενότητα θα δοθεί στην ανάλυση

της πρόβλεψης της βελτίωσης με τη χρήση της προηγούμενης τεχνικής. Μέχρι στιγμής, μια εμπειρική έκφραση για το κέρδος διαφορισμού χώρου έχει αναφερθεί από τους Tan και Pedersen [18] για την ευρωπαϊκή ζώνη συχνοτήτων τοπικού κατανεμημένου συστήματος πολλαπλών σημείων (LMDS-Local Multipoint Distributed System) γύρω στα 42 GHz, η οποία υιοθετήθηκε αργότερα σε μια σύσταση της ITU-R. Το μοντέλο βασίστηκε σε εικόνες ραντάρ που συλλέχθηκαν σε διάστημα δύο ετών και αναφέρεται σε ένα σχήμα διαφορισμού με δύο συνδέσεις ίδιου μήκους και συνδυασμό επιλογής.

Επιπλέον, έχει προταθεί μια βελτιωμένη έκδοση του παραπάνω μοντέλου [19] με την τροποποίηση του μοντέλου ημι-ημιτονοειδούς της μεταβολής του κέρδους και λαμβάνοντας επίσης υπόψη διαμορφώσεις συνδέσμων με άνισα μήκη. Η εμπειρική έκφραση βασίστηκε σε μετρήσεις ραντάρ σε μία κυκλική περιοχή ακτίνας 45 km με κέντρο το Μόντρεαλ του Καναδά. Όπως και προηγουμένως, η εφαρμογή του βελτιωμένου μοντέλου περιορίζεται μόνο σε συνδέσεις οπτικής επαφής (LOS) που λειτουργούν στα 30 GHz στην περιοχή βροχής στην οποία έχει ταξινομηθεί η περιοχή γύρω από το Μόντρεαλ. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση ενός γενικού προγνωστικού μοντέλου, το οποίο ισχύει για οποιαδήποτε συχνότητα άνω των 10 GHz και για βροχοκλιματικές συνθήκες, εφόσον πληρούνται οι ακόλουθες θεμελιώδεις παραδοχές: για την περιγραφή της χωρικής δομής της βροχόπτωσης υιοθετείται το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων, ενώ για τα στατιστικά στοιχεία ρυθμού βροχόπτωσης γίνεται η παραδοχή της λογαριθμοκανονικής κατανομής. Από μια άλλη άποψη, η παρούσα μέθοδος αποτελεί επέκταση μιας διαδικασίας για την πρόβλεψη της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας ενός επίγειου-εναέριου συστήματος διαφορισμού διπλής τοποθεσίας. Το παρόν μοντέλο λαμβάνει επίσης υπόψη τους προτεινόμενους χάρτες βροχής της ITU-R. Τέλος, υπάρχει μια ισχυρή εξάρτηση του προτεινόμενου φυσικού μοντέλου από τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες βροχής.

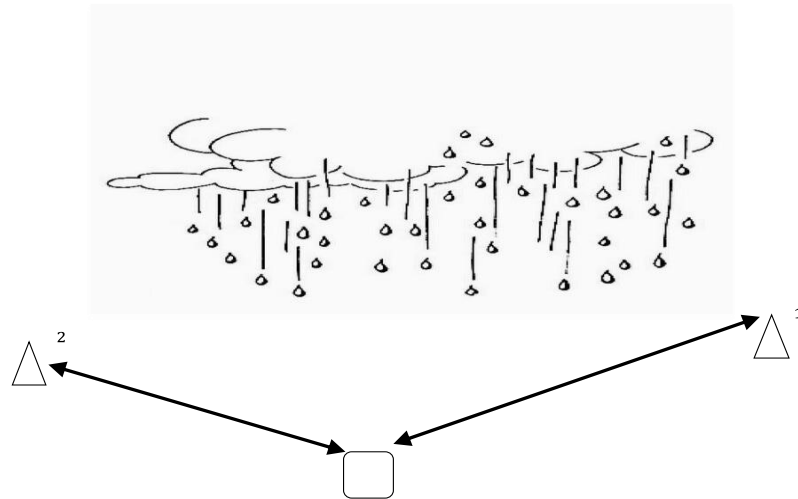
4.4.1 Απόδοση συστήματος διαφορισμού χώρου (site diversity)

Η διάρθρωση του διαφορισμού χώρου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.13, αποτελούμενη από δύο κεντρικούς σταθμούς H_1 και H_2 και έναν δέκτη R λαμβάνοντας τα δύο μήκη διαδρομής, γενικά διαφορετικά, όπου η γωνιακή απόσταση κυμαίνεται από 0 έως 360°. Στόχος μας είναι ο υπολογισμός της βελτίωσης της διαθεσιμότητας της υπηρεσίας με τη χρήση του διαφορισμού χώρου. Αυτό επιτυγχάνεται με την αξιολόγηση της ακόλουθης κοινής πιθανότητας υπέρβασης:

$$P_{1,2} = P[A_{S_1} \geq x_{S_1}, A_{S_2} \geq x_{S_2}] \quad (4.4.1)$$

η οποία παρουσιάζει την πιθανότητα διακοπής για ένα τέτοιο σύστημα, όπου A_{S_1} , A_{S_2} είναι οι εξασθενήσεις που προκαλούνται από τη βροχή των δύο μεμονωμένων διαδρομών και x_{S_1} , x_{S_2} είναι τα αντίστοιχα περιθώρια εξασθένησης. Εάν $x_{S_1} = x_{S_2}$, τότε έχουμε ένα ισορροπημένο σύστημα διαφορισμού χώρου και αυτό συμβαίνει εάν τα μήκη των διαδρομών είναι ίδια, υποθέτοντας ότι οι εξοπλισμοί των σταθμών βάσεως είναι επίσης ίδιοι. Χρησιμοποιούνται επίσης οι παρακάτω μετασχηματισμοί:

$$u_{i(i=1,2)} = \frac{\ln(A_{S_i}) - \ln(A_{m_i})}{S_{a_i}} \quad (4.4.2)$$



Σχήμα 4.14: Διάρθρωση του συστήματος διαφορισμού χώρου [20].

όπου A_{m_i} και S_{a_i} ($i = 1,2$) είναι οι λογαριθμοκανονικές στατιστικές παράμετροι των επαγόμενων εξασθενήσεων βροχής στις συγκλίνουσες ζεύξεις. Αυτές μπορούν να εκφραστούν ως προς τις λογαριθμοκανονικές στατιστικές παραμέτρους του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης (R_m , S_r), τα μήκη διαδρομής και τα χωρικά χαρακτηριστικά της δομής της βροχόπτωσης. Το ζεύγος των λογαριθμοκανονικών παραμέτρων R_m , S_r μπορεί να προκύψει μέσω κατάλληλης προσαρμογής γραμμικής παλινδρόμησης που εφαρμόζεται στους πρόσφατα προτεινόμενους βροχοτόπους ITU-R ή χρησιμοποιώντας τοπικά πειραματικά δεδομένα σημειακών ρυθμών βροχόπτωσης. Οι κατάλληλες παραδοχές που απαιτούνται για την ανάλυση είναι οι ίδιες με εκείνες που παρουσιάζονται

για την πρόβλεψη της απόδοσης διακοπής λειτουργίας των συστημάτων κυψελοειδούς δομής.

Χρησιμοποιώντας περαιτέρω μια απλή άλγεβρα έχουμε τελικά:

$$P_{1,2} = \frac{1}{2} \cdot \int_{u_{D_2}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-u_1^2}{2}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{u_{D_1} - \rho_n \cdot u_1}{\sqrt{2 \cdot (1 - \rho_n^2)}}\right) du_1 \quad (4.4.3)$$

όπου:

$$u_{D_{i(i=1,2)}} = \frac{\ln(x_{S_i}) - \ln(A_{m_i})}{S_{a_i}} \quad (4.4.4)$$

Ο συνολικός ετήσιος χρόνος κατά τον οποίο η ζεύξη δεν είναι διαθέσιμη μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής:

$$T_{out} = 525600 \cdot P_{1,2} \text{ (min/ year)} \quad (4.4.5)$$

Στις παραπάνω εκφράσεις, ρ_n είναι ο λογαριθμικός συντελεστής συσχέτισης εκφρασμένος ως προς τα S_{a_1} , S_{a_2} και ρ_0 ο χωρικός συντελεστής συσχέτισης της ειδικής εξασθένησης (A_0 σε db/km) μεταξύ δύο σημείων του μέσου της βροχής.

4.4.2 Κέρδος συστήματος διαφορισμού χώρου

Το κέρδος διαφορισμού χώρου (CSDG – Cell-Site Diversity Gain) ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της εξασθένησης που υπερβαίνει ένα κατώφλι σε μία μόνο ζεύξη και αυτής που υπερβαίνει το κατώφλι εξασθένησης από κοινού στις δύο ζεύξεις του συστήματος διαφορισμού χώρου, και τα δύο εκφρασμένα σε dB, για ένα σταθερό ποσοστό χρόνου. Ας υποθέσουμε ότι υπάρχει μια εγκατεστημένη ζεύξη με έναν κεντρικό σταθμό βάσης και μια άλλη ζεύξη γίνεται διαθέσιμη για να χρησιμοποιηθεί η τεχνική cell-site diversity. Το κέρδος διαφορισμού χώρου (CSDG) δίνεται ως εξής:

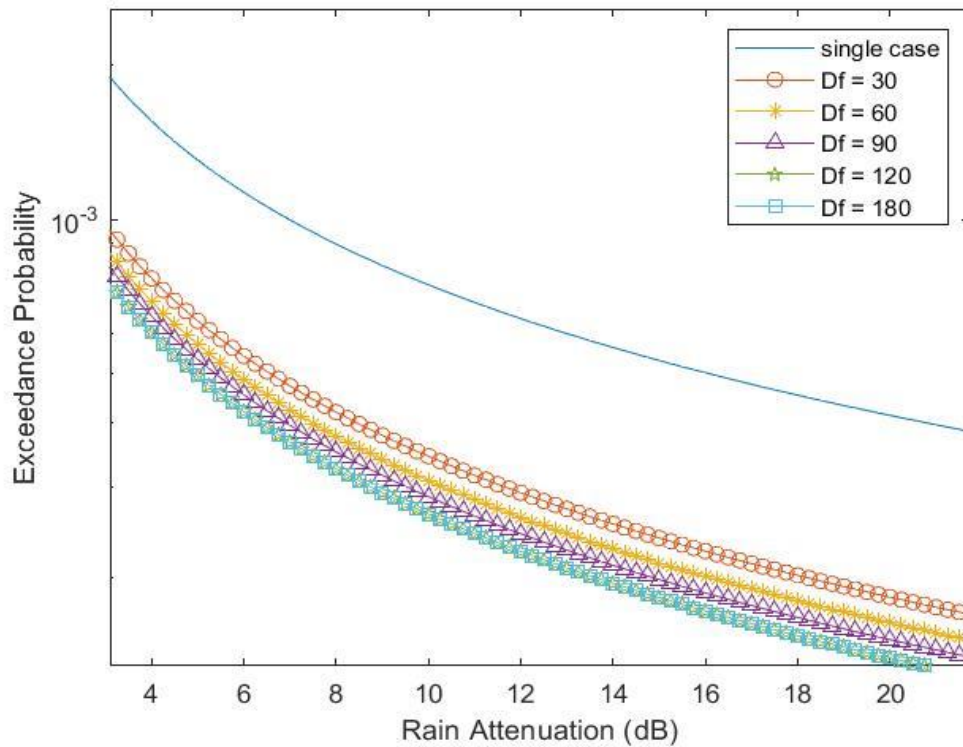
$$CSDG_i = A_{S_i} - A_D \text{ (} i = 1, 2 \text{)} \quad (4.4.6)$$

όπου A_{S_i} (σε dB) είναι το όριο εξασθένησης βροχής που υπερβαίνεται στον i -οστό μεμονωμένο σύνδεσμο και A_D είναι το όριο εξασθένησης βροχής που υπερβαίνεται από κοινού στους δύο συνδέσμους για κάθε σταθερό ποσοστό χρόνου.

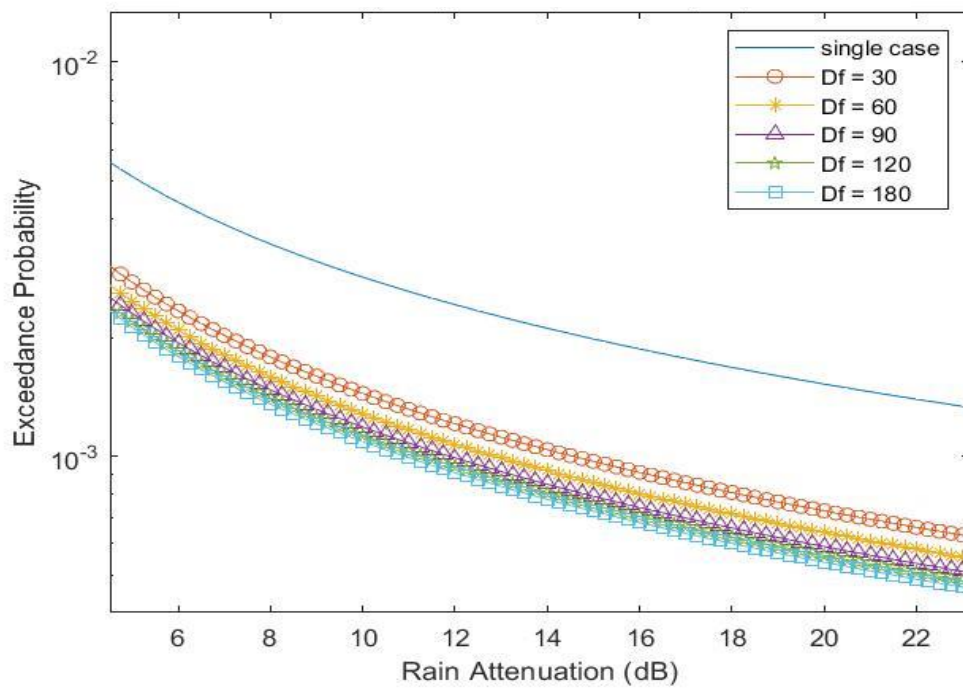
4.4.3 Προσομοίωση συστήματος διαφορισμού χώρου

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της τεχνικής διαφορισμού χώρου στις ελληνικές πόλεις Αθήνα, Ιωάννινα, Χανιά και Κέρκυρα για συχνότητες 20 GHz, 30 GHz, 40 GHz και 50 GHz και για ίσα μήκη $L_1=L_2=1$

km, $L_1=L_2=2$ km και $L_1=L_2=3$ km των δυο ζεύξεων για τους δυο διαφορετικούς σταθμούς βάσης. Αυτοί οι σταθμοί βάσης τοποθετούνται σε διαφορετική γωνία μεταξύ τους σε σχέση με την τοποθεσία του χρήστη. Οι γωνίες που μελετήθηκαν είναι 30° , 60° , 90° , 120° και 180° . Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν στις ενότητες 4.1, 4.2 και 4.4 και υποθέτοντας ότι έχουμε ομοιόμορφη βροχόπτωση και στα δυο μήκη ζεύξεων καθώς και κάθετη πόλωση εξάγουμε τα αποτελέσματα:

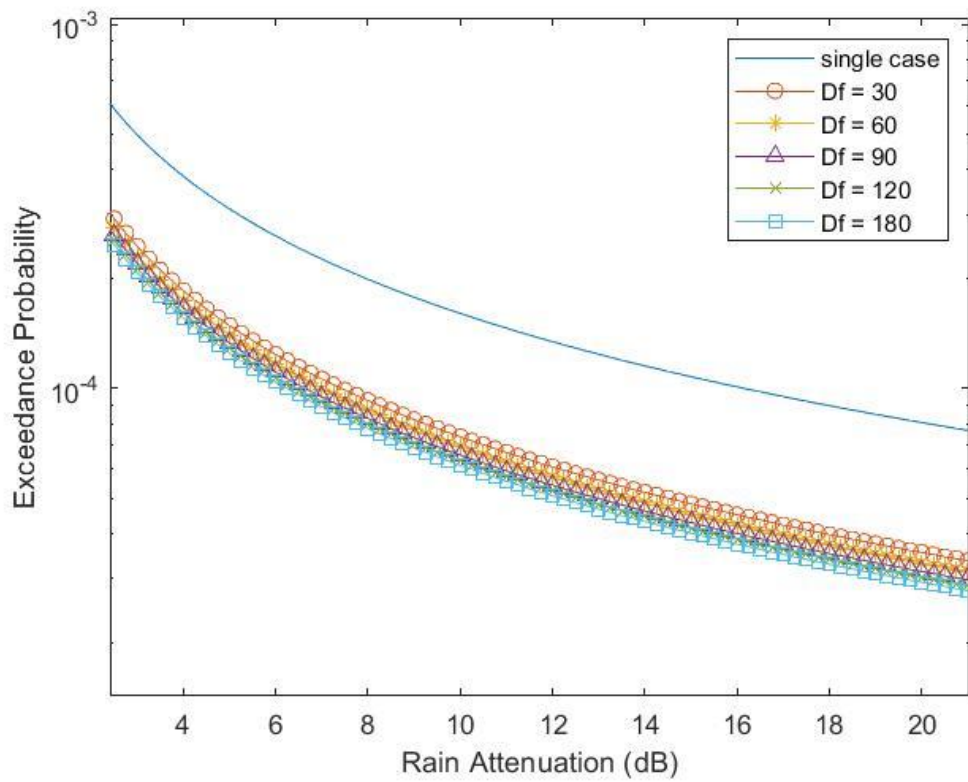


Σχήμα 4.15: Site diversity για Ιωάννινα, συχνότητα 20 GHz, μήκη ζεύξεων $L_1 = L_2 = 3$ km.



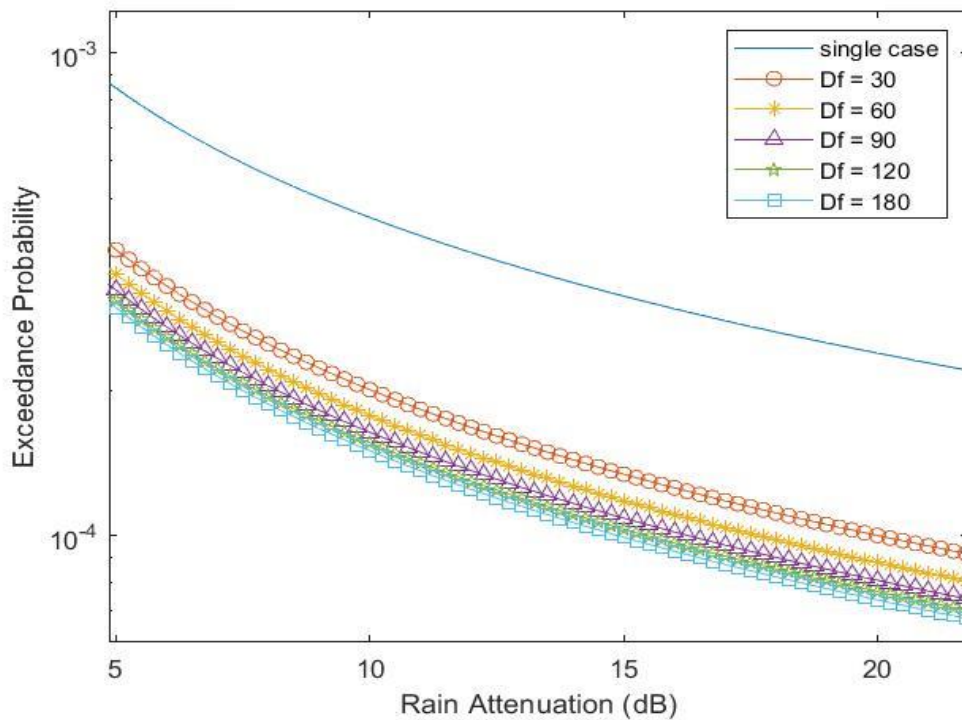
Σχήμα 4.16: Site diversity για Ιωάννινα, συχνότητα 50 GHz,

μήκη ζεύξεων $L_1 = L_2 = 3$ km.



Σχήμα 4.17: Site diversity για Χανιά, συχνότητα 30 GHz,

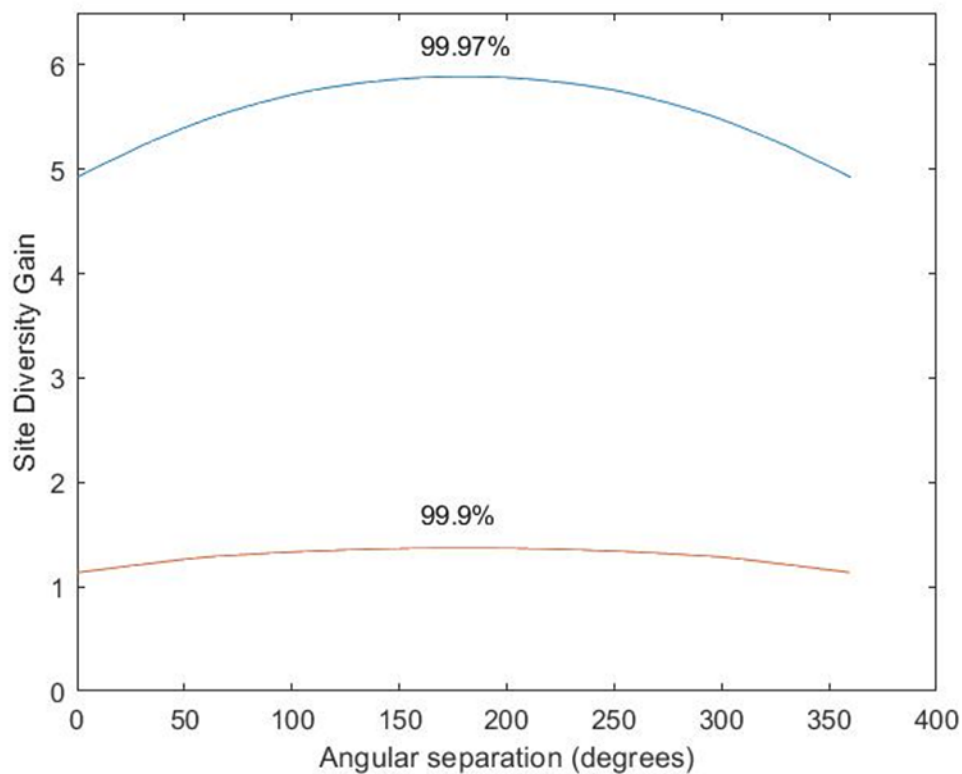
μήκη ζεύξεων $L_1 = L_2 = 1$ km.



Σχήμα 4.18: Site diversity για Χανιά, συχνότητα 30 GHz,
μήκη ζεύξεων $L_1 = L_2 = 3$ km.

Από τα παραπάνω Σχήματα συμπεραίνουμε ότι υπάρχει μια εμφανής βελτίωση της απόδοσης του συστήματος όταν χρησιμοποιούμε έναν δεύτερο σταθμό βάσης. Επίσης, η μέγιστη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος παρατηρείται όταν οι δυο σταθμοί βάσης είναι αντιδιαμετρικά τοποθετημένοι σε σχέση με τη θέση του χρήστη, δηλαδή σχηματίζουν γωνία 180° .

Έστω ότι στα Ιωάννινα ο δεύτερος σταθμός βάσης σχηματίζει γωνία 90° σε σχέση με τον πρώτο σταθμό βάσης και τον χρήστη, τότε για συχνότητα ίση με 50GHz και τα μήκη των δυο ζεύξεων ίσα με 3 km, η πιθανότητα υπέρβασης μειώνεται από $2.85 \cdot 10^{-3}$ στην απλή περίπτωση, σε $1.18 \cdot 10^{-3}$ με χρήση της τεχνικής διαφορισμού χώρου για εξασθένηση λόγω βροχής ίση με 10 dB. Παρομοίως με την τεχνική διαφορισμού χρόνου, όσο αυξάνεται η συχνότητα και τα μήκη των ζεύξεων τόσο αυξάνεται η πιθανότητα υπέρβασης του κατωφλίου εξασθένησης λόγω βροχής. Συγκεκριμένα, στα Χανιά για γωνία μεταξύ σταθμών βάσεων και χρήστη ίση με 120° και συχνότητα ίση με 30 GHz, μεταβάλλοντας το μήκος των δυο ζεύξεων από 1 km σε 3 km, η πιθανότητα υπέρβασης αυξάνεται από $6.33 \cdot 10^{-5}$ σε $1.56 \cdot 10^{-5}$. Σε αυτό το αποτέλεσμα επηρεάζουν και οι αυξημένες απώλειες ελευθέρου χώρου.



Σχήμα 4.19: Κέρδος διαφορισμού για διαθεσιμότητα 99.9% και 99.97% στα Ιωάννινα με συχνότητα 20 GHz και μήκη ζεύξεων 1 km.

Στο Σχήμα 4.19 παρατηρούμε ότι έχουμε μεγαλύτερο διαφορικό κέρδος για μεγαλύτερο ποσοστό διαθεσιμότητας του συστήματος. Η μέγιστη βελτίωση προσδιορίζεται στα 5.89 dB για διαθεσιμότητα στο 99.97% του χρόνου και στα 1.37 dB για διαθεσιμότητα στο 99.9% του χρόνου. Όπως επισημάνθηκε και νωρίτερα το μέγιστο κέρδος επιτυγχάνεται όταν οι σταθμοί βάσης είναι αντιδιαμετρικά τοποθετημένοι σε σχέση με την θέση του χρήστη, δηλαδή όταν σχηματίζουν γωνία 180°.

4.5 Προσέγγιση της χωρητικότητας αποκοπής που επιτυγχάνεται στις ευρυζωνικές ζεύξεις SIMO, MISO και MIMO καναλιών

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται μια νέα αναλυτική προσέγγιση που ενοποιεί τον υπολογισμό της χωρητικότητας αποκοπής που επιτυγχάνεται στην κατερχόμενη και ανερχόμενη ζεύξη ενός συστήματος διαφορισμού χώρου που λειτουργεί υπό βροχή στη ζώνη συχνοτήτων Ku και άνω. Συγκεκριμένα, το σενάριο διαφορισμού κατερχόμενης ζεύξης ερμηνεύεται ως διαμόρφωση ευρυζωνικού καναλιού SIMO, ενώ η ανερχόμενη ζεύξη ως MISO. Σε αυτές τις υψηλές συχνότητες, δεδομένου ότι η πολυδιαδρομική διάδοση είναι ασήμαντη, προκειμένου να αξιοποιηθεί η αρχή MIMO, τα χωρικά

οφέλη του καναλιού που προκύπτουν από τη χωρική ανομοιογένεια της βροχής είναι πιο σημαντικά. Η προσοχή εστιάζεται στις μικρές αποστάσεις (μικρής κλίμακας), γεωμετρικές διαφορισμού χώρου λόγω της πρακτικότητάς τους. Αναλυτικές εκφράσεις κλειστής μορφής για τη χωρητικότητα αποκοπής που επιτυγχάνεται στις περιπτώσεις SIMO και MISO επικυρώνονται μέσω εκτεταμένων αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Οι ευρυζωνικές δορυφορικές επικοινωνίες έχουν προταθεί ως αποτελεσματική λύση για backhaul ζεύξεις. Επιπλέον, η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για υψηλά δεδομένα έχει οδηγήσει στη χρήση συχνοτήτων άνω των 10 GHz. Σε αυτές τις ζώνες συχνοτήτων, η εξασθένηση της βροχής είναι η κυρίαρχη εξασθένηση και το μόνο ατμοσφαιρικό φαινόμενο που παρουσιάζει σημαντική χωρική ανομοιογένεια. Η συνεργασία των υβριδικών δορυφορικών-επίγειων συστημάτων και του συστήματος πολλαπλής εισόδου πολλαπλής-εξόδου (MIMO) έχουν προταθεί προκειμένου να υποστηριχθεί υψηλή απόδοση και να ξεπεραστούν τα φαινόμενα εξασθένησης. Στην παρούσα ενότητα, μελετώνται οι επιδόσεις ενός υβριδικού δορυφορικού-επίγειου MIMO συστήματος και η χωρητικότητα διακοπής υπολογίζεται αναλυτικά. Τα κέρδη των κεραιών προσαρμόζονται στις διαφορετικές διαδρομές των δορυφορικών και επίγειων ζεύξεων με αποτέλεσμα ένα ισορροπημένο σύστημα MIMO από την άποψη της ισοδύναμης ιστροπικά ακτινοβολούμενης ισχύος (EIRP). Τα παρακάτω αριθμητικά αποτελέσματα καταδεικνύουν το κέρδος απόδοσης των τεχνικών χωρικής πολυπλεξίας σε σύγκριση με ένα απλό σύστημα μιας εισόδου και μιας εξόδου (SISO).

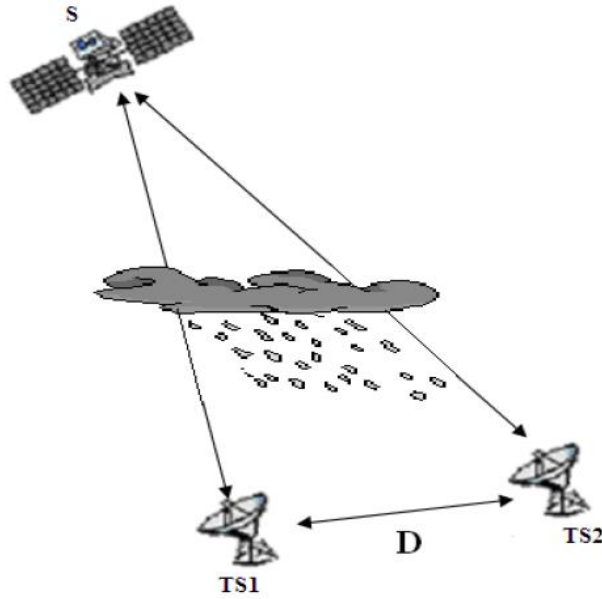
Ένα πιθανό μειονέκτημα αυτού του συστήματος είναι η διαφορετική καθυστέρηση διάδοσης των δορυφορικών και επίγειων συνδέσεων. Ωστόσο, αυτή η μετατόπιση καθυστέρησης θεωρείται ότι λαμβάνεται σωστά και στους δύο πομπούς που επικοινωνούν μεταξύ τους. Μια πιθανή πρακτική λύση αυτού του προβλήματος θα μπορούσε να είναι αυτή που υλοποιείται στο [8], όπου εφαρμόζονται προσαρμοσμένα φίλτρα στα λαμβανόμενα σήματα για την ανίχνευση της διάδοσης καθυστέρησης, το οποίο στη συνέχεια τροφοδοτείται σε έναν ευθυγραμμιστή χρονισμού. Στη συνέχεια, ο προτεινόμενος ευθυγραμμιστής χρονισμού εξαλείφει την καθυστέρηση ρυθμίζοντας το χρονισμό ενός παράλληλου προς σειριακού σήματος μετατροπέα.

4.5.1 Ανάλυση της χωρητικότητας αποκοπής με τις τεχνικές SIMO και MISO

Τα πρότυπα DVB-S2/RCS οδηγούν τις ευρυζωνικές υπηρεσίες επικοινωνίας από την ψηφιακή τηλεόραση και την HDTV μέχρι τις διαδραστικές υπηρεσίες που βασίζονται σε IP και τις επαγγελματικές εφαρμογές που υλοποιούνται μέσω γεωστατικών

(GEO) δορυφόρων. Και τα δύο πρότυπα αναφέρονται σε συχνότητες λειτουργίας άνω των 10 GHz, όπου ο κυρίαρχος μηχανισμός εξασθένησης είναι η εξασθένηση της βροχής. Από την άποψη αυτή, τα σχήματα διαφορισμού που προτάθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1970 για την αντιμετώπιση της εξασθένησης λόγω βροχής αποτελούν μια ώριμη και αποτελεσματική τεχνική μετριασμού της εξασθένησης. Το σχήμα διαφορισμού διακρίνεται σε χωρικό, δορυφορικό (τροχιακό) και συχνότητας, όπου τα δύο πρώτα εκμεταλλεύονται τη χωρική δομή του μέσου βροχόπτωσης. Παρομοίως, οι πιο πρόσφατα αναδυόμενες τεχνολογίες MIMO εκμεταλλεύονται τη χωρική δομή του καναλιού και τα πλεονεκτήματα των συστημάτων πολλαπλών κεραιών για να επιτύχουν μια σημαντική αύξηση της φασματικής απόδοσης σε σχέση με τα συμβατικά SISO χωρίς επιπλέον κόστος φάσματος και μεταδιδόμενης ισχύος. Στην παρούσα ενότητα, διερευνώνται οι κατερχόμενες και ανερχόμενες ζεύξεις και οι διαμορφώσεις δορυφορικού καναλιού ενός συστήματος διαφορισμού χώρου σαν αυτό που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.20, προκειμένου να εκτιμηθεί αναλυτικά η κατανομή της χωρητικότητας αποκοπής για το αντίστοιχο SIMO (μονής εισόδου πολλαπλής εξόδου) και MISO (πολλαπλής εισόδου μονής εξόδου) αντίστοιχα.

Μέχρι στιγμής, η έρευνα για την τεχνολογία MIMO έχει ως επί το πλείστον επικεντρωθεί σε επίγεια συστήματα επικοινωνιών που λειτουργούν σε συχνότητες πολύ κάτω των 10GHz όπου οι συνθήκες διάδοσης δημιουργούν ένα πλούσιο περιβάλλον σκέδασης. Ωστόσο, τα φαινόμενα διάδοσης είναι αρκετά διαφορετικά για τις επικοινωνίες στη ζώνη Ku και άνω. Η γραμμή ορατότητας (LOS) μεταξύ του πομπού και του δέκτη θεωρείται πρακτική αναγκαιότητα και έτσι μπορούν να εκμεταλλευτούν τις υψηλότερες κατευθυντικότητες των κεραιών. Η πολυδιαδρομική διάδοση είναι ασήμαντη, ενώ η εξασθένηση από τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις είναι καίριας σημασίας, δηλαδή η βροχόπτωση αποτελεί τον κυρίαρχο μηχανισμό εξασθένησης και παρουσιάζει χωρική ανομοιογένεια εντός των αποστάσεων ενδιαφέροντος. Ενώ τα επίγεια κανάλια υπόκεινται σε συνθήκες πολυδιαδρομικής διάδοσης, στο δορυφορικό σενάριο η αρχή MIMO μπορεί να εφαρμοστεί εκμεταλλευόμενη αυτά τα χωρικά χαρακτηριστικά του καναλιού.



Σχήμα 4.20: Κατερχόμενη (2x1 SIMO) και ανερχόμενη (1x2 MISO) διάρθρωση δορυφορικού καναλιού σε ένα διπλό σύστημα διαφορισμού χώρου που λειτουργεί στη Ku ζώνη συχνοτήτων και άνω [21].

Ειδικότερα, υπάρχει πρόβλεψη για το σενάριο κατερχόμενης ζεύξης με τη διάρθρωση δορυφορικού καναλιού SIMO, ενώ στο σενάριο ανοδικής ζεύξης μια διάρθρωση δορυφορικού καναλιού MISO.

4.5.2 SIMO/MISO Μοντέλο ευρυζωνικού καναλιού

Στο Σχήμα 4.20 απεικονίζεται ένας διπλό σύστημα διαφορισμού χώρου που λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων Ku και άνω. Δύο τερματικοί σταθμοί, TS1 και TS2, είναι εξοπλισμένοι με κεραίες υψηλής κατευθυντικότητας και επικοινωνούν με έναν μόνο δορυφόρο, S. Στο σενάριο κατερχόμενης ζεύξης, ένα 2x1 SIMO δορυφορικό κανάλι προβλέπεται, ενώ στην ανερχόμενη ζεύξη προβλέπεται ένα δορυφορικό κανάλι 1x2 MISO. Η απόσταση διαχωρισμού μεταξύ TS1 και TS2 συμβολίζεται με D (km). Η ίδια γωνία ανύψωσης φ λαμβάνεται και για τα δύο κεκλιμένα μονοπάτια TS1-S και TS2-S, δεδομένου ότι θεωρούνται παράλληλες. Για τον ίδιο λόγο, το μήκος d και των δύο λοξών μονοπατιών είναι επίσης περίπου το ίδιο, ενώ οι τυχαίες μεταβλητές A_{Ri} ($i=1,2$) που αντιπροσωπεύουν την εξασθένηση (σε dB) λόγω βροχής, έχουν τις ίδιες στατιστικές παραμέτρους (σύστημα ισορροπημένου διαφορισμού).

Υποθέτοντας LOS μεταξύ κάθε TS και S και το ότι η κεραία κάθε TS βρίσκεται στο οπτικό πεδίο του δορυφόρου S, η διαδρομή για κάθε ζεύξη TS-S μοντελοποιείται ως εξής

$$g_i \propto d^{-2} \cdot 10^{-A_{Ri}/10}, (i = 1,2) \quad (4.5.1)$$

Σημειώστε ότι το g_i ποικίλλει μεταξύ της κατερχόμενης και της ανερχόμενης ζεύξης κυρίως λόγω της διαφοράς στη συχνότητα f η οποία, με τη σειρά της, επηρεάζει την κατανομή των A_{Ri} ($i=1,2$). Επιπλέον, δεδομένου ότι οι εξαιρετικά κατευθυντικές κεραίες των TS βρίσκονται στο οπτικό πεδίο του δορυφόρου S, το κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας είναι ίσο με 1 και συνεπώς, μπορεί να παραλείπεται στην (4.5.1). Με βάση τα παραπάνω, τα προκύπτοντα SIMO και MISO ανάγονται στα ακόλουθα διανύσματα:

$$\mathbf{h} = \begin{cases} \mathbf{h}_{dl} \\ \mathbf{h}_{ul} \end{cases} = \begin{cases} [h_{1dl} & h_{2dl}]^T \\ [h_{1ul} & h_{2ul}] \end{cases} = \begin{cases} \exp(\frac{j2\pi df_{dl}}{c}) \cdot [\sqrt{g_{1dl}} \sqrt{g_{2dl}}]^T & SIMO \\ \exp(\frac{j2\pi df_{ul}}{c}) \cdot [\sqrt{g_{1ul}} \sqrt{g_{2ul}}] & MISO \end{cases}$$

όπου οι δείκτες dl και ul αναφέρονται στην κατερχόμενη και ανερχόμενη ζεύξη αντίστοιχα, ο εκθέτης c δηλώνει τον ανάστροφο πίνακα και c είναι η ταχύτητα του φωτός.

4.5.3 Ανάλυση της χωρητικότητας αποκοπής για MISO, SIMO συστήματα

Για την ανάλυση της παρούσας ενότητας, υπάρχει πλήρης γνώση του καναλιού στον δέκτη (π.χ. μέσω DVB-S2 πιλοτικά μπλοκ συμβόλων), ενώ στην πλευρά του πομπού, δεν υπάρχει γνώση των συνθηκών του καναλιού. Αυτό είναι λογικό, δεδομένου ότι τα δορυφορικά συστήματα λειτουργούν με διπλή διαίρεση συχνότητας (FDD). Στο σενάριο ανοδικής ζεύξης (MISO), ελλείπει πληροφοριών κατάστασης καναλιού (CSI) στην πλευρά εκπομπής, η θεωρία της πληροφορίας υπαγορεύει μια ίση κατανομή ισχύος στους δύο επίγειους σταθμούς TS1 και TS2. Από την άλλη πλευρά, στην κάτω ζεύξη (SIMO), η συνολική ισχύς εκπομπής κατανέμεται αποκλειστικά στον ένα δορυφορικό πομπό. Παρόλα αυτά, η συνολική ισχύς εκπομπής στις περιπτώσεις ανοδικής ζεύξης και στα σενάρια καθοδικής ζεύξης διαφέρουν λόγω των αυστηρότερων περιορισμών ισχύος στο ωφέλιμο φορτίο του δορυφόρου από ό,τι στους επίγειους σταθμούς. Αυτό έχει άμεσο αντίκτυπο στο λαμβανόμενο SNR και, στην πραγματικότητα μας εμποδίζει να συγκρίνουμε άμεσα τις χωρητικότητες που επιτυγχάνονται στα σενάρια ανοδικής και καθοδικής ζεύξης.

Από την κοινή MIMO θεωρία, υιοθετείται η ακόλουθη γνωστή σχέση για την χωρητικότητα (σε bps/Hz) των MIMO καναλιών:

$$C = \log_2 \det(I_{M_R} + \frac{P_T}{M_T \cdot N_o} \cdot \mathbf{h}\mathbf{h}^H) \quad (4.5.2)$$

όπου ο εκθέτης H συμβολίζει τον συζυγή ανάστροφο πίνακα, I_{MR} είναι ο $M_R \times M_R$ ταυτοτικός πίνακας, P_T η συνολική μέση ισχύς διαθέσιμη στην πλευρά εκπομπής, N_0 η φασματική πυκνότητα θορύβου στην είσοδο του δέκτη και οι M_R , M_T υποδηλώνουν τον αριθμό των κεραιών στην πλευρά λήψης και εκπομπής, αντίστοιχα. Δηλαδή, στο σενάριο της κατερχόμενης ζεύξης (SIMO): $M_R=2$, $M_T=1$, ενώ στο σενάριο ανοδικής ζεύξης (MISO): $M_R=1$, $M_T=2$.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές μοντελοποίησης του καναλιού για κάθε σενάριο, η (4.5.2) γράφεται ως εξής:

$$C = \begin{cases} \log_2(1 + SNR_{dl} \cdot 10^{\frac{A_{R1,dl}}{10}} + SNR_{dl} \cdot 10^{\frac{A_{R2,dl}}{10}}) & SIMO \\ \log_2(1 + \frac{SNR_{dl}}{2} \cdot 10^{\frac{A_{R1,ul}}{10}} + \frac{SNR_{dl}}{2} \cdot 10^{\frac{A_{R2,ul}}{10}}) & MISO \end{cases} \quad (4.5.3)$$

όπου SNR_x ($x = dl, ul$) είναι οι (διαφορετικές) ονομαστικές τιμές SNR υπό συνθήκες καθαρού ουρανού στις αντίστοιχες περιπτώσεις κατερχόμενης και ανερχόμενης ζεύξης.

Παρατηρώντας προσεκτικά την (4.5.3), μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι και στις δύο περιπτώσεις SIMO και MISO, η στιγμιαία χωρητικότητα C ακολουθεί την ίδια έκφραση, γεγονός που απλοποιεί τους υπολογισμούς στη συνέχεια και ενοποιεί την ανάλυση. Δηλαδή,

$$C = \log_2(1 + SNR \cdot (10^{\frac{A_{R1}}{10}} + 10^{\frac{A_{R2}}{10}})) \quad (4.5.4)$$

όπου

$$\{SNR, A_{Ri}\} = \begin{cases} \{SNR_{dl}, A_{Ri,dl}\} & SIMO \\ \{SNR_{ul}/2, A_{Ri,ul}\} & MISO \end{cases} \quad (i = 1,2) \quad (4.5.5)$$

Η εξίσωση (4.5.4) παρέχει μια έκφραση για τη στιγμιαία χωρητικότητα ενός ντε-τερμινιστικού καναλιού SIMO/MISO $\mathbf{h}$. Ωστόσο, δεδομένου ότι η βροχόπτωση εισάγει αργές διαλείψεις και στοχαστική συμπεριφορά στο κανάλι $\mathbf{h}$, το κατάλληλο στατιστικό μέτρο για τον χαρακτηρισμό της απόδοσης του πολλαπλού συστήματος κεραιών είναι η χωρητικότητα διακοπής που ορίζεται από:

$$P(C \leq R_{out}) = q \quad (4.5.6)$$

όπου R_{out} (bps/Hz) είναι ο εγγυημένος ρυθμός πληροφορίας για το $(1-q)100\%$ των υλοποιήσεων του καναλιού.

Λαμβάνοντας υπόψη το μετασχηματισμό RV:

$$u_i = [\ln(A_{R_i}) - \ln(A_m)] / S_a, \quad (i = 1,2) \quad (4.5.7)$$

ο οποίος συνδέει τις λογαριθμοκανονικές τυχαίες μεταβλητές εξασθένησης βροχής A_{Ri} ($i=1,2$) με τις κανονικοποιημένες κανονικές τυχαίες μεταβλητές u_i ($i=1,2$), αντικαθιστώντας την (4.5.4) στη σχέση (4.5.6) και μετά από κάποια απλή άλγεβρα, προκύπτει η εξής αναλυτική έκφραση κλειστής μορφής για την χωρητικότητα αποκοπής:

$$P(C \leq R_{out}) = \frac{1}{2} \cdot \int_K^{+\infty} du f_U(u) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\Lambda - \rho_n \cdot u}{\sqrt{2 \cdot (1 - \rho_n^2)}}\right) = q \quad (4.5.8)$$

όπου $\operatorname{erfc}(\cdot)$ είναι η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος, $f_U(\cdot)$ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κανονικής κατανομής, ρ_n ο συντελεστής λογαριθμικής συσχέτισης ανάμεσα στις κανονικές τυχαίες μεταβλητές u_i ($i = 1,2$) και K, Λ δίνονται αναλυτικά από τις παρακάτω σχέσεις:

$$K = \frac{\ln[10 \cdot \log_{10}(\frac{SNR}{2^{R_{out}} - 1})] / A_m}{S_a} \quad (4.5.9)$$

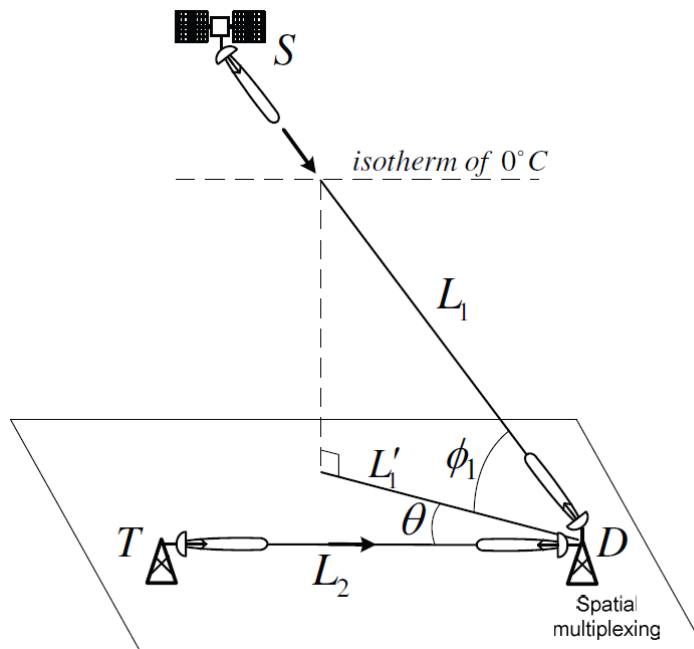
$$\Lambda = \frac{\ln[10 \cdot \log_{10}(\frac{SNR}{2^{R_{out}} - 1 - \frac{SNR \cdot 10^{\frac{A_m \cdot \exp(u \cdot S_a)}{10}}}})] / A_m}{S_a} \quad (4.5.10)$$

Οι ποσότητες (A_m, S_a) που παρατηρούνται στις σχέσεις (4.5.7)-(4.5.10) είναι οι εξής στατιστικές παράμετροι των λογαριθμοκανονικών RV A_{Ri} ($i=1,2$) και η αναλυτική τους έκφραση δίνεται στην ενότητα 4.3. Αυτές οι μεταβλητές εξαρτώνται μεταξύ άλλων από τη συχνότητα λειτουργίας f και επομένως, η στατιστική κατανομή της εξασθένησης της βροχής μεταξύ κατερχόμενης και ανερχόμενης ζεύξης είναι διαφορετική. Είναι σημαντικό να υπογραμμιστεί ότι η οδηγία ITU-R Rec. P.837-5 σχετικά με τους λεγόμενους χάρτες βροχής παρέχει τον σημειακό ρυθμό βροχόπτωσης για ετήσιες ποσοστιαίες κατανομές πιθανοτήτων για κάθε γεωγραφικό μήκος και πλάτος, με βάση τις οποίες, υπολογίζονται οι παράμετροι (A_m, S_a) . Αυτό καθιστά την προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόσιμη σε παγκόσμια κλίμακα.

Συμπερασματικά, λαμβάνοντας υπόψη τις (4.5.7)-(4.5.10) καθώς και τον ισομορφισμό που εκφράζεται στην (4.5.4) σχετικά με τη στιγμιαία χωρητικότητα στις περιπτώσεις SIMO και MISO, μπορεί κανείς να εξάγει αναλυτικές εκφράσεις κλειστής μορφής για τη χωρητικότητα διακοπής που επιτυγχάνεται στην κατερχόμενη και την ανερχόμενη ζεύξη ενός συστήματος διαφορισμού χώρου.

4.5.4 Μοντέλο καναλιού MIMO

Η γεωμετρική διαμόρφωση ενός υβριδικού δορυφορικού-επίγειου MIMO (2x2) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.1. Ο τελικός προορισμός D λαμβάνει δύο ανεξάρτητες ροές δεδομένων: μία που μεταδίδεται από το δορυφόρο S και μια άλλη που μεταδίδεται από το γήινο τερματικό T. Η γωνία ανύψωσης του δορυφόρου S συμβολίζεται ως ϕ_1 (μοίρες). Το πραγματικό μήκος της δορυφορικής ζεύξης SD, που αντιστοιχεί στο τμήμα της κεκλιμένης διαδρομής SD από τον γήινο προορισμό D στην ισόθερμη των 0° C , συμβολίζεται ως L_1 (km) και η προβολή του στη Γη συμβολίζεται ως $L_1' \text{ (km)} = L_1 \cdot \cos\phi_1$, ενώ το μήκος της επίγειας ζεύξης TD συμβολίζεται ως L_2 (km). Η επίγεια ζεύξη TD και η προβολή της δορυφορικής σύνδεσης SD στη Γη σχηματίζουν την γωνία θ (μοίρες).



Σχήμα 4.21: Γεωμετρική αναπαράσταση ενός υβριδικού δορυφορικού-επίγειου MIMO συστήματος [22].

Τόσο οι δορυφορικές όσο και οι επίγειες ζεύξεις ικανοποιούν τη γραμμή όρασης (LOS) (δεδομένου ότι αναφερόμαστε σε υπηρεσία που χρησιμοποιεί σταθερό δορυφόρο και σταθερές συνδέσεις υπηρεσίας). Εφόσον η απόσταση της δορυφορικής ζεύξης είναι μεγαλύτερη από την επίγεια, υποφέρει από μεγαλύτερες απώλειες ελεύθερου χώρου. Παρόλα αυτά, τα κέρδη της κεραίας του πομπού, $G_{j,tr}$ (dBi) και του δέκτη, $G_{j,rec}$ (dBi) και στις δύο ζεύξεις j ($j = 1,2$) επιλέγονται έτσι ώστε να αντισταθμίζονται οι απώλειες ελεύθερου χώρου PL_j (dB) :

$$G_{j,tr} + G_{j,rec} = PL_j \quad (4.5.11)$$

Η επιλογή αυτή οδηγεί σε ένα ισορροπημένο κανάλι MIMO όσον αφορά την ισχύ και την ισχύ (EIRP). Το σύστημα λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10 GHz και υποφέρει από την εξασθένηση λόγω της βροχής. Οι εξασθενήσεις της βροχής που προκαλούνται στις δορυφορικές και επίγειες διαδρομές συμβολίζονται ως A_j (dB), $j=1,2$ αντίστοιχα. Η κατακόρυφη δομή του μέσου βροχόπτωσης περιγράφεται από την υπόθεση του Crane και η εξασθένηση της βροχής από την προβολή του πραγματικού μήκους της δορυφορικής σύνδεσης στη γη που έχει μήκος L_1' και δίνεται από τη σχέση (σε dB):

$$A_1' = A_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (4.5.12)$$

Οι εξασθενήσεις βροχής A_1, A_2 συσχετίζονται με τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την άνευ όρων από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή. Ο όρος άνευ όρων σημαίνει ότι περιλαμβάνει τόσο τον χρόνο βροχής όσο και τον χρόνο μη βροχής. Οι στατιστικές παράμετροι των τυχαίων μεταβλητών A_1', A_2 συμβολίζονται ως A_{mj}, S_{aj} ($j = 1,2$). Αυτές οι παράμετροι εξαρτώνται από τη διαδρομή, δηλαδή τα μήκη L_1' και L_2 αντίστοιχα, τις σταθερές της ειδικής εξασθένησης της βροχής a, b [15] και τις στατιστικές παραμέτρους της σημειακής βροχόπτωσης R_m, S_r . Οι τελευταίες παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν μέσω ανάλυσης προσαρμογής παλινδρόμησης σε τοπικά δεδομένα βροχόπτωσης ή σε ITU-R [14] για οποιαδήποτε τοποθεσία του κόσμου, ενώ οι σταθερές a, b εξαρτώνται από τη συχνότητα, την προσπίπτουσα πόλωση, τη θερμοκρασία και την κατανομή του μεγέθους των σταγόνων βροχής.

Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των κανονικών τυχαίων μεταβλητών $\ln A_1, \ln A_2$ μπορεί να υπολογιστεί με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\rho_n = \ln(1 + \rho \cdot \sqrt{(\exp(S_{a_1}^2) - 1) \cdot (\exp(S_{a_2}^2) - 1)}) / (S_{a_1} \cdot S_{a_2}) \quad (4.5.13)$$

Η χωρική πολυπλεξία επιτυγχάνεται με τη χρήση εξαιρετικά κατευθυντικών κεραιών και επιλέγοντας μια όσο το δυνατόν μεγαλύτερη γωνία. Ο μεγάλος γωνιακός διαχωρισμός έχει ως αποτέλεσμα σχετικά χαμηλό συντελεστή συσχέτισης και, συνεπώς, το κανάλι MIMO μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι (ιδανικά) αποσυσχετισμένο.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παραδοχές και τις εκφράσεις (4.5.11) και (4.5.12), ένα παράλληλο κανάλι MIMO που εξαρτάται μόνο από την εξασθένηση της βροχής μπορεί να θεωρηθεί με πίνακα καναλιού $\mathbf{H}$ που δίνεται από:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{10^{-A_1/(10 \cdot \cos \varphi_1)}} \cdot e^{i \cdot \varphi_1} & 0 \\ 0 & \sqrt{10^{-A_2/10}} \cdot e^{i \cdot \varphi_2} \end{pmatrix} \quad (4.5.14)$$

Στην (4.5.14), η γωνία φ_j ($j=1,2$) θεωρείται ότι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στο διάστημα $[0,2\pi)$.

4.5.5 Ανάλυση της χωρητικότητας αποκοπής σε MIMO συστήματα

Η πιθανότητα αποκοπής της χωρητικότητας ενός υβριδικού δορυφορικού-επίγειου MIMO συστήματος ορίζεται ως ο λόγος όπου η ολική MIMO χωρητικότητα C (bps/Hz) δεν υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο κατώφλι C_{th} :

$$P_{out} = P(C < C_{th}) \quad (4.5.15)$$

Θεωρώντας ισοδύναμη κατανομή ισχύος της συνολικής ισχύος μετάδοσης P_T ανάμεσα στη δορυφορική και στην επίγεια διαδρομή όπως περιγράφεται στις ενότητες 4.5.3-4.5.4, η MIMO χωρητικότητα στη σχέση (4.5.15) δίνεται από την γνωστή φόρμουλα της MIMO θεωρίας [12,13]:

$$C = \log_2 \det(I_2 + \frac{P_T}{2 \cdot N_0} \cdot \mathbf{H}\mathbf{H}^H) = \sum_{j=1}^2 \log_2 (1 + \frac{P_T}{2 \cdot N_0} \cdot \lambda_j) \quad (4.5.16)$$

όπου το $\mathbf{I}_2$ είναι ο μοναδιαίος 2×2 πίνακας, N_0 είναι η φασματική πυκνότητα θορύβου στο δέκτη, λ_j ($j = 1,2$) είναι οι θετικές ιδιοτιμές του πίνακα $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ και ο εκθέτης H συμβολίζει τον συζυγή ανάστροφο πίνακα.

Λαμβάνοντας υπόψη το μοντέλο καναλιού της σχέσης (4.5.14) και ορίζοντας ως SNRcs (dB) το σηματοθορυβικό λόγο (SNR) κάτω από συνθήκες καθαρού ουρανού, που αντιστοιχεί στην συνολική MIMO ισχύς μετάδοσης P_T , η χωρητικότητα της (6) μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση:

$$C = \log_2 (1 + \frac{1}{2} \cdot 10^{\frac{SNR_{cs} - A_1' / \cos \varphi_1}{10}}) + \log_2 (1 + \frac{1}{2} \cdot 10^{\frac{SNR_{cs} - A_2}{10}}) \quad (4.5.17)$$

Η από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή των A_1' , A_2 μπορεί να κατασκευαστεί από την από κοινού κανονική κατανομή χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία της ενότητας 4.3 μέσω του μετασχηματισμού:

$$\begin{cases} U_1 = (\ln A_1' - \ln A_{m_1}) / S_{a_1} \\ U_2 = (\ln A_2 - \ln A_{m_2}) / S_{a_2} \end{cases} \quad (4.5.18)$$

Η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας της (4.5.15) μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία που περιγράφεται στην ενότητα 4.3 για ένα παρόμοιο πρόβλημα τροχιακού δορυφορικού διαφορισμού. Ολοκληρώνοντας την κοινή λογαριθμοκανονική κατανομή επί του γεγονότος διακοπής που ορίζεται από τις (4.5.15) και (4.5.17), χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό της (4.5.18) και μετά την εφαρμογή του

θεωρήματος του Bayes, η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$P_{out} = \frac{1}{2} \cdot \int_{u_{j0}}^{+\infty} f_{U_1}(u_1) \cdot \text{erfc}\left(\frac{u_{20} - \rho_n \cdot u_1}{\sqrt{2 \cdot (1 - \rho_n^2)}}\right) du_1 \quad (4.5.19)$$

Στη σχέση (4.5.19) η $\text{erfc}(\cdot)$ είναι η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος, η $f_{U_1}(u_1)$ είναι η κανονική κατανόμη [14], ενώ τα όρια u_{j0} ($j=1,2$) μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$u_{j0} = \frac{\ln A_{j0} - \ln A_{mj}}{S_{a_j}} \quad (4.5.20)$$

όπου:

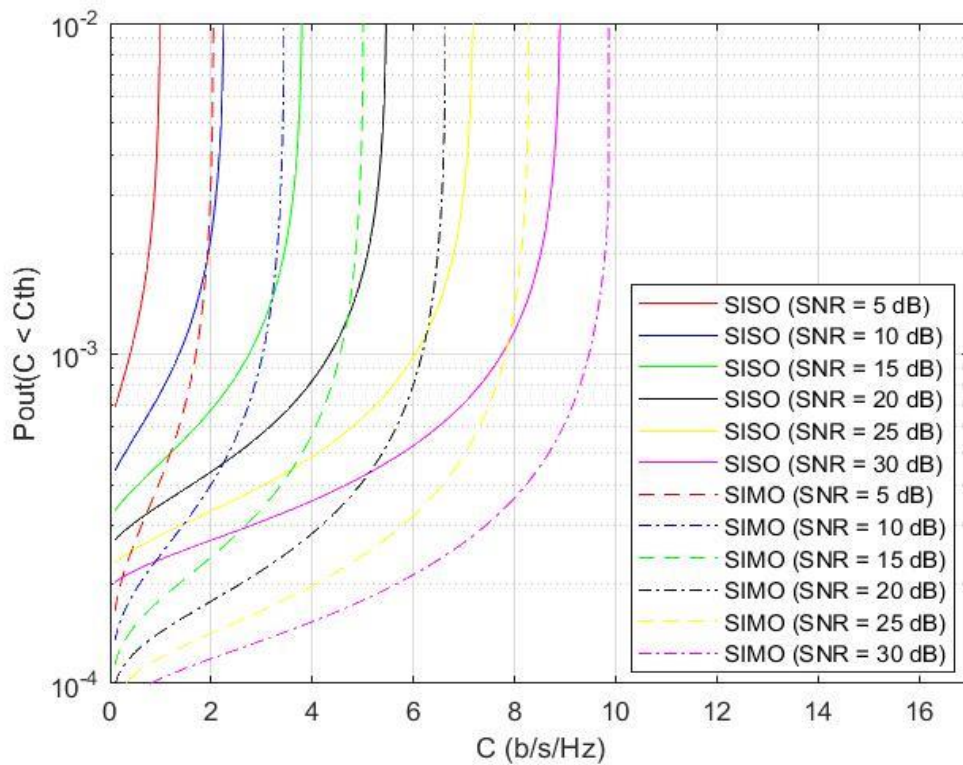
$$A_{10} = 10 \cdot \cos \varphi_1 \cdot \log\left(\frac{1}{2} \cdot 10^{\frac{SNR_{cs}}{10}}\right) - 10 \cdot \cos \varphi_1 \cdot \log(2^{C_{th}} - 1), \quad (4.5.21)$$

$$A_{20} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{2} \cdot 10^{\frac{SNR_{cs}}{10}}\right) - 10 \cdot \log\left(1 + \frac{1}{2} \cdot 10^{\frac{SNR_{cs} - A'_1 / \cos \varphi_1}{10}}\right) - 10 \cdot \log\left(2^{C_{th}} + \frac{1}{2} \cdot 10^{\frac{SNR_{cs} - A'_1 / \cos \varphi_1}{10}}\right)$$

4.5.6 Προσομοίωση της χωρητικότητας αποκοπής που επιτυγχάνεται στις ευρυζωνικές ζεύξεις SIMO, MISO σε επίγεια συστήματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης για το αναλυτικό μοντέλο που παρουσιάστηκε στις ενότητες 4.5.2 - 4.5.3 προσαρμοσμένο σε επίγεια συστήματα για ευρυζωνικές ζεύξεις SIMO/MISO. Για να προσαρμοστεί το συγκεκριμένο μοντέλο σε επίγεια συστήματα επιλέχθηκε μηδενική γωνία ανύψωσης και ορθογώνια πόλωση. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίνονται με την απλή περίπτωση (SISO), όπου υπάρχει ένας σταθμός βάσης και ένας χρήστης. Θεωρήθηκε ότι υπάρχει ένα σύστημα διαφορισμού χώρου, το οποίο βρίσκεται στην Αθήνα και λειτουργεί στην Ka ζώνη συχνοτήτων ($f = 20$ GHz), ενώ οι αποστάσεις μεταξύ χρήστη και σταθμών βάσης είναι στο 1 km. Επίσης, θεωρήθηκε ότι λόγω των μικρών αποστάσεων μεταξύ του χρήστη και των σταθμών βάσης η εξασθένηση λόγω βροχής είναι πρακτικά η ίδια και στις δυο ζεύξεις που χρησιμοποιούνται. Όπως είναι φανερό από το παρακάτω σχήμα η διαφορά μεταξύ των καμπυλών SIMO/MISO και SISO μεγαλώνει όσο αυξάνεται το SNR. Παρατηρούμε ότι με την εφαρμογή της τεχνικής SIMO/MISO για συνθήκες καθαρού ουρανού (SNRcs) ίσες με 20 dB και πιθανότητα υπέρβασης ίση με 10^{-3} , η χωρητικότητα αυξάνεται από 6.53 b/s/Hz σε 9.25 b/s/Hz. Παρόμοια απόδοση

μπορεί να παρατηρηθεί και σε τοποθεσίες με διαφορετικά φασματικά και κλιματικά χαρακτηριστικά. Ακόμα, είτε η ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας αυξάνεται είτε όσο οι κλιματικές συνθήκες στην περιοχή γίνονται πιο έντονες, η εξασθένιση λόγω βροχής αυξάνεται και η χωρητικότητα αποκοπής σε κάθε αντίστοιχη περίπτωση μειώνεται αντίστοιχα. Τέλος, καμία σημαντική επίδραση δεν παρατηρήθηκε μεταξύ της απόστασης των δυο σταθμών βάσης και της χωρητικότητας αποκοπής.



Σχήμα 4.22: Τεχνική διαφορισμού SIMO/MISO για Αθήνα για διάφορες κλιματικές συνθήκες, σε συχνότητα 20 GHz και μήκη ζεύξεων ίσα με 1 km.

5 Κεφάλαιο: Μελλοντικές προοπτικές και ανοιχτά ερευνητικά θέματα για τα backhaul δίκτυα 5^{ης} γενιάς

5.1 Προκλήσεις στα κινούμενα δίκτυα

Πολλές χώρες όπως η Κίνα, η Γαλλία, η Ισπανία, η Γερμανία, η Νότια Κορέα, η Ιαπωνία και η Σουηδία έχουν αναπτύξει είναι ευρύ δίκτυο σιδηροδρόμων υψηλής ταχύτητας (HSR - High Speed Railway) για να συνδεθούν οι μεγάλες πόλεις μεταξύ τους. Κάθε χρόνο, περίπου 1.5 δισεκατομμύρια επιβάτες ταξιδεύουν μέσω HSR μόνο στην Κίνα. Όσο ένας μεγάλος αριθμός χρηστών ταξιδεύει με τρένο για μια εκτεταμένη χρονική περίοδο, δεν είναι δύσκολο να φανταστεί κανείς ότι θα μπορούν αυτοί να έχουν πρόσβαση στις διαδικτυακές υπηρεσίες, και συγκεκριμένα τις υπηρεσίες πολυμέσων.

Τα HSR τρένα ταξιδεύουν με ταχύτητα 250-500 Km/h για να μειωθεί ο χρόνος μετακίνησης των επιβατών. Σε αυτή την ταχύτητα, δεδομένου ότι υπάρχει χαμηλή καθυστέρηση και ευρέως διαδεδομένη ασύρματη επικοινωνία, η επίδραση του φαινομένου Doppler μεταθέτει αρκετά την λειτουργική συχνότητα καθώς η μετατόπιση Doppler είναι ανάλογη της ταχύτητας του δέκτη. Για παράδειγμα, στην εξίσωση (5.1) παρατηρείται ότι η ταχύτητα (v) του οχήματος επηρεάζει αναλογικά την συχνότητα ραδιοκύματος που λαμβάνει ο δέκτης (f_{obs}) αν η συχνότητα της πηγής είναι η f_{orig} . Το θ αντιστοιχεί στην γωνία μεταξύ της ταχύτητας του οχήματος και της κατεύθυνσης του εισερχόμενου σήματος. Συνεπώς η συσκευή του χρήστη εντός οχήματος μπορεί να μην είναι ρυθμισμένη στην παρατηρούμενη συχνότητα (f_{obs}) και να υφίσταται πτώσεις κλήσεων.

$$f_{obs} = v \cdot f_{orig} \cdot \cos \theta \quad (5.1.1)$$

Γενικά, το μεταλλικό σώμα και τα μονωμένα γυάλινα παράθυρα των HSR κάνουν τα πράγματα χειρότερα αφού τα ραδιοκύματα έχουν υποβαθμισμένη ποιότητα σήματος λόγω διείσδυσης σε αυτά τα υλικά. Οι πιο πρόσφατες λύσεις όπως η εγκατάσταση ηλεκτρικά αγωγίμης επένδυσης παραθύρου, μπορούν να μειώσουν τις απώλειες διείσδυσης παραθύρου σε κάποιες περιπτώσεις. Ωστόσο, οι απώλειες από διείσδυση σε όχημα (VPL – Vehicular Penetration Loss), εξαιτίας του μεταλλικού σώματος των HSR, η επίδραση του Doppler και ο μεγάλος αριθμός μεταγωγών παραμένουν σοβαρές προκλήσεις οι οποίες θα αντιμετωπιστούν με τη βοήθεια των κινούμενων κυψελών.

Για τη σιδηροδρομική επικοινωνία, το πρωτόκολλο LTE για σιδηροδρόμους (LTE-R – LTE Railway) είναι ένας δημοφιλής τρόπος ασύρματης επικοινωνίας. Το LTE-R υλοποιήθηκε για πρώτη φορά στη Νότια Κορέα και μπορεί να παρέχει ταχύτητες έως 100 Mbps με 20 MHz εύρος ζώνης [23]. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη την μελλοντική ζήτηση δεδομένων, η οποία θα προκύπτει κυρίως λόγω εφαρμογών πολυμέσων, αυτή η χωρητικότητα δεδομένων είναι πολύ περιορισμένη. Για παράδειγμα, μια απλή σύνδεση ευρυεκπομπής βίντεο υψηλής ανάλυσης μέσα σε τρένο απαιτεί ρυθμούς δεδομένων έως 3 Gbps (επιτρέποντας 1920 x 1080 60Hz 24 bits) σε ένα 40 MHz κανάλι για έναν απλό χρήστη [24]. Με περισσότερους από 100 χρήστες σε ένα βαγόνι τρένου, υποθέτοντας ότι όλοι έχουν πρόσβαση σε εφαρμογές πολυμέσων, οι αριθμοί αυξάνονται σημαντικά.

Επομένως, οι πάροχοι σιδηροδρομικών μέσων και οι ερευνητές υποστηρίζουν την παροχή μετάδοσης πολλαπλών gigabit χρησιμοποιώντας μικροκυματική backhaul ζεύξη. Ωστόσο, εξαιτίας της εχθρότητας που αντιμετωπίζει η μικροκυματική ζώνη, υπάρχουν πολλές προκλήσεις που σχετίζονται με αυτή. Για αυτό το λόγο προτείνονται τροποποιήσεις στη δομή του πλαισίου OFDM για μικροκυματική επικοινωνία για να γίνει δυνατή η μετάδοση πολλαπλών gigabit και να απαλυνθεί το πρόβλημα της μεγάλης μετατόπισης Doppler. Αυτές οι αλλαγές περιλαμβάνουν τροποποιήσεις στο διάκενο μεταξύ των καναλιών, σε αλλαγές στο σύμβολο και στο μέγεθος του υποπλαισίου και προσθήκη μηχανισμών ανατροφοδότησης.

Ακόμα μια πρόκληση που σχετίζεται με το HSR είναι πολλές φορές το ανώμαλο έδαφος. Οι ερευνητές πασχίζουν να μοντελοποιήσουν ραδιοκανάλια σε πολύπλοκα εδάφη που περιλαμβάνουν βουνά, τούνελ, κοιλαδογέφυρες, ποτάμια, λιβάδια, καθώς και αστικές ή αγροτικές περιοχές. Σε ένα τόσο ετερογενές μεγάλο δρομολόγιο σιδηροδρόμου, είναι μια πρόκληση η παροχή ομοιόμορφης μετάδοσης πολλαπλών gigabit στην backhaul ζεύξη. Μικροκυματική ή οπτικής ίνας backhaul ζεύξη μπορεί να είναι κατάλληλη για υπόγειους σιδηρόδρομους ή αστικούς σιδηρόδρομους, αλλά κλιμακώνοντας αυτά τα μοντέλα σε πολύ μεγάλες διαδρομές είναι πολύ κοστοβόρο. Ακόμα με την κάτω των 6 GHz ζώνη συχνοτήτων backhaul ζεύξη, και οι δυο μηχανισμοί (αργών και γρήγορων) διαλείψεων υποβαθμίζουν την ποιότητα της ζεύξης σε τέτοιες ταχύτητες, ακόμα με την χρήση εξαιρετικά προηγμένης backhaul κεραίας. Επομένως, χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για την ανάπτυξη μοντέλων για τα HSR. Τέλος, τα θέματα μεταγωγών για τους HSR με μικροκυματική backhaul ζεύξη χρειάζονται ακόμα αρκετή έρευνα.

5.1.1 Ασφάλεια κινούμενων δικτύων

Όπως σε κάθε άλλη τεχνολογία δικτύων, η ασφάλεια και η ιδιωτικότητα είναι ιδιαίτερης σημασίας και στα κινούμενα δίκτυα. Γενικά, η σχετική έρευνα με την ασφάλεια στο συνηθισμένο στατικό στρώμα και στα Ad hoc δίκτυα οχημάτων (VANETs - Vehicular Ad hoc Networks) μπορεί να υιοθετηθεί με μικρές παραλλαγές και μικροδιορθώσεις, για να διασφαλίσουν και την επικοινωνία κινούμενων δικτύων. Συγκεκριμένα, τα VANETs συσχετίζονται στενά με τα κινούμενα δίκτυα και επομένως οι ερευνητές μπορούν να δανειστούν κάποιες πτυχές λύσεων των VANETs στην ασφάλεια και την ιδιωτικότητα για να ασφαλίσουν τα κινούμενα δίκτυα. Ωστόσο είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το μεγαλύτερο κομμάτι της έρευνας που σχετίζεται με την ασφάλεια σε VANET επικεντρώνεται στο περιορισμένου εύρους ζώνης του Έξυπνου Συστήματος Μεταφορών (ITS - Intelligent Transport System), το οποίο μπορεί να είναι άμεσα εφαρμόσιμο στα κινούμενα δίκτυα και επομένως περαιτέρω έρευνα χρειάζεται σε αυτό το πεδίο. Προτείνεται [25] ένας μηχανισμός για να ασφαλίσει η επικοινωνία φυσικού στρώματος για τους εντός οχήματος χρήστες που χρησιμοποιούν τηλεφωνικές ζεύξεις πρόσβασης. Εκμεταλλεύόμενος κάποιος τις διαφορές στις συνθήκες κατάστασης του καναλιού μπορεί να διακρίνει έναν που κρυφακούει (εκτός οχήματος). Σε αυτόν που κρυφακούει η πρόσβαση στη μετάδοση της ζεύξης πρόσβασης απορρίφθηκε εκμεταλλευόντας τις VPL οι οποίες μειώνουν σημαντικά την ποιότητα του σήματος εκτός της κινητής κυψέλης. Για τα HSR σήματα ελέγχου, τα πρωτόκολλα ασφαλείας ορίζονται από το παγκόσμιο σύστημα κινητών επικοινωνιών για σιδηροδρόμους (GSM-R - Global System for Mobile Communication for railways) και το LTE-R. Αυτά τα πρότυπα απλά ασχολούνται με τα κανάλια ελέγχου του σιδηροδρόμου και δεν παρέχουν ασφάλεια στην επικοινωνία χρηστών εντός των HSR.

Παρά τις ερευνητικές προσπάθειες, οι προκλήσεις ασφαλείας στα κινούμενα δίκτυα θα είναι λίγο διαφορετικές και σε βελτιωμένη έκδοση των υπάρχουσών προκλήσεων ασφαλείας και ιδιωτικότητας στα VANETs. Για παράδειγμα, η κινητικότητα είναι το αποκορύφωμα των κινούμενων δικτύων, ωστόσο η μεγάλη ταχύτητα εισάγει επιπλέον προκλήσεις όπως υπεργρήγορης αυθεντικοποίησης, ελέγχου πρόσβασης, ανταλλαγή εμπιστευτικών πληροφοριών και μηχανισμών οικονομικού ελέγχου για τους παρόχους. Επίσης, η αποσύνδεση των παρόχων δικτύου και άλλες τεχνολογίες όπως το IoT θα εισάγουν περαιτέρω την ανάγκη για αποτελεσματικά μέτρα ασφαλείας. Από αυτή την άποψη, η ασφάλεια θα πρέπει να διερευνηθεί για τα κινούμενα δίκτυα.

Επίσης, το βασισμένο σε τεχνολογία IP δίκτυο κορμού των τωρινών τηλεφωνικών τεχνολογιών εκτίθεται σε επιθέσεις που είναι δύσκολο να περιορίσεις. Πρόσφατα, η μηχανική μάθηση (ML – Machine Learning) και η βαθιά μάθηση (DL - Deep Learning) έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για να αντιμετωπιστούν θέματα ασφαλείας σε πολλά δίκτυα συμπεριλαμβανομένου το IoT. Περαιτέρω έρευνα χρειάζεται για την υλοποίηση των ML και DL για την αντιμετώπιση διαφορετικών προβλημάτων ασφαλείας στα κινούμενα δίκτυα. Είναι επίσης σημαντικό να τονιστεί ότι η πρόσφατη εφαρμογή του κανονισμού γενικής προστασίας δεδομένων (GDPR - General Data Protection Regulation) θα περιορίσει τους παρόχους στο να προστατέψει την ιδιωτικότητα των χρηστών και επομένως περαιτέρω έρευνα χρειάζεται για να γίνουν οι υπηρεσίες σύμφωνες με το GDPR. Μια πιθανή λύση θα μπορούσε να είναι η εισαγωγή αλγορίθμων διαφανής συλλογής δεδομένων και επεξεργασίας στον πυρήνα των παρόχων. Ωστόσο, θα πρέπει να υπάρχει μια αντιστάθμιση ανάμεσα στην ασφάλεια, ιδιωτικότητα, και την επένδυση των παρόχων. Με λίγα λόγια, η ασφάλεια των κινούμενα δικτύων είναι εξαιρετικά σημαντική και θα επηρεάσει άμεσα την εφαρμοσιμότητα των κινούμενων δικτύων.

5.1.2 Ενεργειακή απόδοση σε κινούμενες κυψέλες

Στο κοντινό μέλλον, τα υβριδικά ή ηλεκτρικά οχήματα αναμένεται να ξεπεράσουν τα οχήματα ορυκτών καυσίμων τουλάχιστον στις αναπτυγμένες οικονομίες. Αυτά τα οχήματα είναι μερικώς (ή εντελώς) υποκινούμενα από ισχύ μπαταρίας και καταναλώνουν λίγο ή καθόλου ορυκτό καύσιμο. Αυτά τα οχήματα θα μπουν σε φάση μετακίνησης στις πράσινες και έξυπνες πόλεις. Αφού τα μελλοντικά δίκτυα (5G,6G, και παραπέρα) οραματίζονται πράσινη επικοινωνία, είναι επιτακτική ανάγκη οι οντότητες όπως τα κινούμενα δίκτυα επίσης να εφαρμόζουν τους περιορισμούς ισχύος χωρίς να συμβιβάζονται με την QoS.

Ο στόχος της πράσινης επικοινωνίας στα κινητά δίκτυα πρέπει να είναι η χρήση ελάχιστης ισχύος μπαταρίας έτσι ώστε οι πρωτεύοντες λειτουργίες του αυτοκινήτου να μην παρεμποδίζονται. Αυτό εγγυάται για τον σχεδιασμό αποδοτικών αλγορίθμων ελέγχου ισχύος για να παρέχονται σθεναρές μεταδόσεις στις backhaul, πλευρικές και ζεύξεις πρόσβασης χωρίς να απορροφάται μεγάλη ποσότητας ενέργειας από την μπαταρία του αυτοκινήτου.

5.1.3 Πρακτικές θεωρήσεις κινούμενων κυψελών

Εκτός από τις προαναφερόμενες τεχνικές ερευνητικές προκλήσεις, κάποιες πρακτικές ανησυχίες επίσης χρειάζονται σκέψη. Για παράδειγμα, οι επιβάτες μέσα σε λεωφορεία ή τρένα μπορεί να χρησιμοποιούν υπηρεσίες από διάφορους παρόχους. Η εγκατάσταση του διάφορου εξοπλισμού εντός οχήματος (πχ. κεραιές ή προσωρινές μνήμες κλπ.) από τον κάθε πάροχο θα απαιτεί μεγάλο κόστος υποδομής και συντήρησης για όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη (δηλαδή τηλεφωνικοί πάροχοι, πάροχοι μέσων μετακίνησης κλπ.). Επομένως, αποτελεσματικοί μηχανισμοί για διαμοιρασμό φυσικών πόρων όπως το φάσμα, οι κεραιές και το σύστημα προσωρινής μνήμης απαιτούνται για να ωφελήσουν όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη. Αυτό αναπόφευκτα θα ενθαρρύνει την χρήση της υποδομής ως υπηρεσία (IaaS - Infrastructure as a Service).

Από την άλλη πλευρά, οι πρόσφατες ανησυχίες ότι μεγάλη ποσότητα σταθμών βάσεων 5G θα περιστοιχίζουν το περιβάλλον μας, έχουν προκαλέσει συζητήσεις σχετικές με συνεχείς ηλεκτρομαγνητικές εκθέσεις και την επίδραση τους στους ανθρώπους. Η ιδέα ότι οι κεραιές πρόσβασης μέσα σε κινούμενες κυψέλες θα μεταδίδουν συνεχώς ραδιοκύματα σε χωρικά κοντινούς εντός οχήματος χρήστες μπορεί να προκαλέσει ανησυχίες. Επομένως, οι ειδικοί αυτού του πεδίου θα πρέπει να διεξάγουν μια αναλυτική μελέτη που θα ρυθμίζει τα επιτρεπόμενα όρια ισχύος μετάδοσης τα οποία δεν είναι μόνο ασφαλή για τους ανθρώπους αλλά παρέχουν επίσης υψηλή QoS στους χρήστες τηλεφωνίας.

5.1.4 Μη επίγεια δίκτυα (NTN - Non Terrestrial Network) που υποστηρίζονται από backhaul ζεύξεις

Περισσότερα από τα υπάρχοντα έργα που σχετίζονται με την backhaul ζεύξη κινούμενης κυψέλης επικεντρώνονται σε επίγειους σταθμούς βάσεως για τις backhaul ζεύξεις. Ωστόσο, η ενσωμάτωση των NTN μέσα στη μελλοντική τηλεφωνική υποδομή βρίσκεται σε φάση τυποποίησης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε κεντρικά πλεονεκτήματα υπό τον όρο της παγκόσμιας κάλυψης, ιδιαίτερα σε περιοχές με φτωχή συνδεσιμότητα. Η 3GPP Release 17 εργάζεται επί του παρόντος στην ανάπτυξη πρωτοκόλλων RAN και λύσεις για λειτουργίες NTN. Αναμένεται ότι οι προδιαγραφές θα συνεχιστούν με βελτιώσεις στα Release 18 και 19. Το NTN θεωρείται το κύριο συστατικό για δίκτυα έκτης γενιάς (6G)

Μια επικοινωνία δυνατή από NTN ελέγχεται από πομποδέκτες που βρίσκονται είτε στο διάστημα (πχ. σε ένα δορυφόρο ή σε ένα αστερισμό δορυφόρων) ή αερόβιες

πλατφόρμες μεγάλου υψόμετρου (HAPs - High Altitude Platforms), όπως τα μη επανδρωμένα αεροχήματα (UAVs) και αερόστατα [26]. Επομένως, το NTN μπορεί να καλύψει μια πιο ευρεία περιοχή, συχνά με ζεύξεις near-LOS, συγκρινόμενο με τους επίγειους σταθμούς βάσης. Η βιομηχανία ερευνά διαδικτυακή κάλυψη δυνατή από NTN σε περιοχές όπου είναι δύσκολο να εγκατασταθούν επίγειοι σταθμοί βάσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, δορυφόροι και HAPs αναμένονται να συμπληρώνουν τους επίγειους σταθμούς βάσης παρά να προσφέρουν συνδεσιμότητα με ένα ολιστικό τρόπο. Τα NTN μπορεί επίσης να παρέχει backhaul ζεύξεις στις κινούμενες κυψέλες σε περιοχές με μικρή ή καθόλου συνδεσιμότητα. Συγκεκριμένα, οι HSR ή τα υπεραστικά λεωφορεία που συχνά ταξιδεύουν μέσω περιοχών χαμηλής δικτυακής κάλυψης μπορούν να επωφεληθούν από τις NTN backhaul ζεύξεις. Η αρχιτεκτονική NTN αποτελείται από ζεύξεις υπηρεσίας, ζεύξη τροφοδοσίας και γείωση. Η backhaul ζεύξη κινούμενης κυψέλης μπορεί να συνδεθεί με τον NTN πομποδέκτη χρησιμοποιώντας τη ζεύξη υπηρεσίας.

Είναι επίσης σημαντικό να τονιστεί ότι τα προηγούμενα χρόνια έχουμε δει μια απότομη αύξηση της εμπορευματοποίησης προτάσεων/έργων για εκτόξευση μεγάλων αστερισμών από δορυφόρους χαμηλής τροχιάς (LEO - Low Earth Orbit) για να παρέχεται μια παγκόσμια και ομοιόμορφη κάλυψη της ευρυζωνικής πρόσβασης. Οι δορυφορικές ζεύξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ασύρματες backhaul ζεύξεις στις κινούμενες κυψέλες ακόμα και σε θαλάσσιες (όπως πλοία και κρουαζιερόπλοια) και αερόβιες (όπως τα αεροπλάνα) περιπτώσεις χρήσεων. Σε περιοχές όπου οι backhaul ζεύξεις για λεωφορεία ή τρένα υψηλής ταχύτητας είναι δύσκολο να βρεθούν, οι NTN backhaul ζεύξεις μπορούν να βελτιώσουν υπηρεσίες για τους επίγειους σταθμούς βάσης. Ωστόσο, η δορυφορική επικοινωνία έχει το δικό της σύνολο προκλήσεων που χρειάζεται λεπτομερή έρευνα, ειδικά όταν λαμβάνουμε υπόψη σιδηρόδρομους υψηλής ταχύτητας. Μία από τις κύριες προκλήσεις στη δορυφορική backhaul επικοινωνία είναι η μετατόπιση Doppler, ειδικά για δορυφόρους χαμηλής τροχιάς. Η επίδραση του φαινομένου Doppler εξαιτίας της κίνησης του δορυφόρου στα GEO συστήματα στις περισσότερες περιπτώσεις μπορεί να είναι αμελητέα. Ωστόσο, μια φυσική συνέπεια χρήση των GEO συστημάτων είναι η μεγάλη καθυστέρηση μετάδοσης (συχνά της κλίμακας των 100 milliseconds).

Ακόμα μια μεγάλη πρόκληση προέρχεται από άποψη της εμπορευματοποίησης. Το χτίσιμο και η εκτόξευση δορυφόρων έχουν μεγάλο κόστος και ακόμα το χαμηλότερο όριο κόστους μπορεί να υπερβεί το ένα δισεκατομμύριο δολάρια. Η παροχή

ευρείας και αδιάλειπτης κάλυψης απαιτεί έναν αστερισμό εκατοντάδων δορυφόρων. Επομένως, το μέλλον των δορυφορικών ζεύξεων είναι ακόμα αβέβαιο.

Οι ερευνητές έχουν επίσης ερευνήσει τις πιθανότητες εγκατάστασης αναμεταδοτών με τα UAV. Αντίθετα με τους δορυφόρους, οι αναμεταδότες UAV προσφέρουν χαμηλό κόστος υλοποίησης και μικρότερη καθυστέρηση μετάδοσης. Λόγω της πρωτοποριακής έρευνας σε στερεής κατάστασης μπαταριών ιόντων λιθίου, τα σύγχρονα UAV μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες για εκτεταμένες χρονικές περιόδους. Για το σκοπό αυτό, αυτοί οι UAV αναμεταδότες μπορεί να παρέχουν backhaul ζεύξεις για τις επίγειες κινούμενες κυψέλες. Οι αναμεταδότες UAV προσφέρουν έναν νέο βαθμό ελευθερίας λόγω της μεγαλύτερης εμβέλειας μετάδοσης συγκρινόμενοι με τους επίγειους κόμβους. Στο [27] ερευνάται η παράδοση προσωρινά αποθηκευμένου περιεχομένου σε επίγειους χρήστες χρησιμοποιώντας UAV αναμεταδότες. Μια ενδιαφέρουσα κατεύθυνση μπορεί να είναι από την κινούμενη κυψέλη στην UAV επικοινωνία για τις backhaul μεταδόσεις, όταν η ζεύξη του σταθμού βάσης μακροκυψέλης είναι αδύναμη ή δεν υπάρχει. Ακόμα μια σημαντική κατεύθυνση που αφορά την UAV επικοινωνία μπορεί να είναι η μοντελοποίηση τρισδιάστατων (3D) καναλιών για τις επικοινωνίες υποβοηθούμενες από UAV.

5.2 MPLS στην τοποθεσία κυψέλης

Η διαδικασία σκέψης που συνήθως οδηγεί στην αιτιολόγηση του MPLS στο χώρο της κυψέλης είναι η εξής:

- Η απαίτηση εύρους ζώνης στην τοποθεσία κυψέλης αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά λόγω της υιοθέτησης εφαρμογών δεδομένων κινητής τηλεφωνίας.
- Για την αποτελεσματική διαχείριση αυτής της προβλεπόμενης αύξησης του εύρους ζώνης, απαιτούνται υπηρεσίες μεταφοράς με βάση τις οπτικές ίνες στο χώρο της κυψέλης.
- Το Native Ethernet, ή ακόμα και το Carrier Ethernet, δεν είναι αρκετό για να παρέχει την απαιτούμενη QoS, τη μηχανική της κίνησης και την ανθεκτικότητα για τη μεταφορά μικτής κίνησης φωνής και δεδομένων εντός του δικτύου RAN. Ελλείψει εξελιγμένων δυνατοτήτων μηχανικής της κίνησης, θα απαιτηθεί υπερπρομήθεια Ethernet, η οποία μπορεί να είναι ακόμη πιο δαπανηρή.

Με βάση τα παραπάνω επιχειρήματα, οι υποστηρικτές του MPLS στο χώρο της κυψέλης πιστεύουν ότι τα σχήματα υλοποίησης για τη μεταφορά Ethernet μέσω MPLS, όπως το RFC 4448 [28] παρέχουν την επεκτασιμότητα του εύρους ζώνης, διατηρώντας παράλληλα την απαιτούμενη QoS. Για το χειρισμό της QoS, οι διαφοροποιημένες κλάσεις υπηρεσιών MPLS, «Επιταχυσμένη Προώθηση (EF-Expedited Forwarding)» και «Επιβεβαιωμένη Προώθηση (AFxy - Assured Forwarding)», επιτρέπουν την εύκολη αντιστοίχιση και την επεξεργασία πακέτων προώθησης διαφόρων υπηρεσιών, όπως «συζήτησης», «ροής δεδομένων» και «αλληλεπίδρασης» για το UTRAN, καθώς και τυποποιημένες κλάσεις κίνησης που σηματοδοτούνται μέσω των τιμών QoS αναγνώρισης τάξης (QCI - QoS Class Identifier) εντός του φορέα Evolved-UTRAN (E-UTRAN).

Επιπλέον, στην περίπτωση του UTRAN, το MPLS παρέχει το πρόσθετο πλεονέκτημα ότι επιτρέπει τη μετάβαση από TDM σε ATM σε RAN βασισμένο σε IP. Επομένως, καθώς το MPLS έχει αποδειχθεί ως η τεχνολογία επιλογής για την ενοποίηση διαφορετικών ενσύρματων δικτύων, παρόμοια πλεονεκτήματα θα οδηγήσουν στην υιοθέτησή του στο UTRAN backhaul.

Τα τυπικά επιχειρήματα που προβάλλονται κατά της ιδέας του MPLS στην τοποθεσία κυψέλης είναι τα πρόσθετα κεφάλαια και τα λειτουργικά έξοδα. Η κοινή επικρατούσα αντίληψη είναι ότι οι συσκευές με δυνατότητα MPLS είναι πιο ακριβές από ότι, για παράδειγμα, οι καθαρές συσκευές Ethernet, λόγω της πρόσθετης επεξεργασίας υλικού ή/και λογισμικού που απαιτείται για το σχετικό σύνολο πρωτοκόλλων.

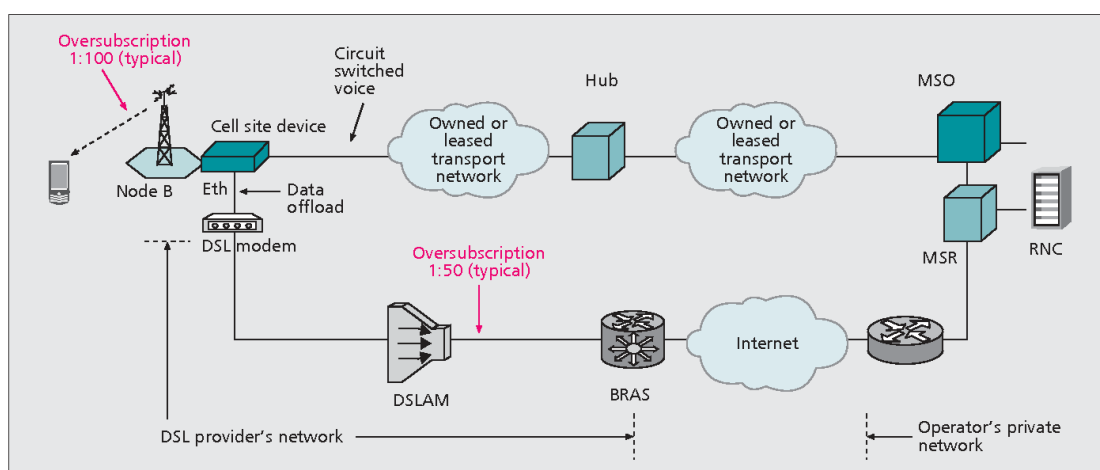
5.3 RAN backhaul μέσω xDSL

Μια άλλη προσέγγιση για την αντιμετώπιση της προβλεπόμενης απότομης αύξησης των απαιτήσεων σε εύρος ζώνης στην τοποθεσία κυψέλης είναι η χρήση της ευρέως διαθέσιμης xDSL (Digital Subscriber Line) πρόσβασης. Οι υποστηρικτές αυτής της προσέγγισης υποστηρίζουν ότι η τεχνολογία xDSL έχει εξελιχθεί αρκετά ώστε να θεωρείται αξιόπιστη εναλλακτική λύση στην προσέγγιση της επέκτασης της οπτικής ίνας στην τοποθεσία κυψέλης. Η κύρια ιδέα πίσω από αυτή την προσέγγιση είναι να κατατμηθεί η κίνηση από τον κόμβο B σε δύο διαφορετικές ροές, μία ροή "μόνο φωνής" που μεταφέρει φωνή με μεταγωγή κυκλώματος και μία ροή "μόνο δεδομένων" που μεταφέρει κίνηση που παράγεται μέσω τυπικών εφαρμογών δεδομένων. Εφόσον οι εφαρμογές δεδομένων μπορούν να αντέξουν μεγαλύτερη καθυστέρηση και απώλεια πακέτων, λόγω εγγενών μηχανισμών σε αυτές τις εφαρμογές, η «εκφόρτωση δεδομένων» μέσω xDSL θεωρείται λογική επιλογή για την αντιμετώπιση της αναμενόμενης

αύξησης των απαιτήσεων εύρους ζώνης. Μια γενική υλοποίηση του RAN backhaul μέσω xDSL παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1.

Τα προφανή πλεονεκτήματα που συνδέονται με αυτή την προσέγγιση είναι τα εξής:

- Κόστος: Στις περισσότερες περιοχές, το κόστος της πρόσβασης xDSL στην τοποθεσία κυψέλης είναι πολύ φθηνότερο από τις συνήθεις υπηρεσίες T1/E1 ή ακόμη και ιδιωτικών γραμμών Ethernet.
- Ταχύτητα μετάδοσης: Η πρόσβαση xDSL είναι διαθέσιμη μέσω της υπάρχουσας εγκατάστασης χαλκού και οι ζεύξεις backhaul μπορούν να διατεθούν χωρίς να χρειάζεται να περιμένει κανείς τη διαθεσιμότητα οπτικών ινών στο χώρο της κυψέλης.



Σχήμα 5.1: Ένα γενικό σχήμα υλοποίησης του RAN backhaul μέσω συνδέσεων xDSL [6].

Τα επιχειρήματα που συνήθως χρησιμοποιούνται για να αντισταχθεί κάποιος σε αυτή την προσέγγιση είναι τα εξής:

- Η υψηλότερη πιθανότητα μπλοκαρίσματος που οδηγεί σε αυξημένη καθυστέρηση ή/και απώλεια πακέτων: Για τη βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος, η συνήθης πρακτική είναι ο διαμοιρασμός των διαθέσιμων κωδικών για HSPA για μεγάλο αριθμό ενεργών χρηστών. Επομένως, κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής, είναι πολύ πιθανό να υπάρχουν αναλογίες υπερδέσμευσης της ζεύξης αέρα 1:100. Ωστόσο, εάν η ίδια ζεύξη με υψηλή υπερ-συνδρομή συνδεθεί μέσω xDSL, εισάγεται ένα πρόσθετο επίπεδο αποκλεισμού, μεταξύ των συνδέσεων πολυπλέκτη πρόσβασης DSL (DSLAM - DSL Access Multiplexer) και ευρυζωνικού διακομιστή απομακρυσμένης πρόσβασης (BRAS - Broadband Remote Access Server). Ακόμη και σε ένα δίκτυο xDSL

που έχει σχεδιαστεί με ελευθερία, η αναλογία υπερ-συνδρομών 1:50 είναι τυπική. Επομένως, στη χειρότερη περίπτωση, το backhaul μέσω xDSL μπορεί να εμφανίσει πολύ υψηλή πιθανότητα φραγής κατά τις ώρες αιχμής, οδηγώντας σε υπερβολική καθυστέρηση ή/και απώλεια πακέτων, κάτι που δεν είναι επιθυμητό.

- Έλλειψη κατάλληλων εργαλείων διαχείρισης βλαβών: Τα εργαλεία ανίχνευσης και απομόνωσης βλαβών είναι αρκετά ασήμαντα, ιδίως σε σύγκριση με εκείνα που χρησιμοποιούνται για τις μισθωμένες γραμμές ή τα ιδιωτικά δίκτυα. Τα πράγματα γίνονται χειρότερα, αφού αυτές οι ζεύξεις πρέπει να διασχίσουν το διαδίκτυο, όπου οι συμφωνίες επιπέδου υπηρεσιών (SLAs - Service Level Agreements) μεταξύ ομότιμων παρόχων είναι συνήθως της βέλτιστης προσπάθειας, με ελάχιστα ή καθόλου τυποποιημένα εργαλεία για την εγγύηση των SLA μεταξύ παρόχων.
- Περιορισμοί εύρους ζώνης ή/και εμβέλειας: Οι περισσότερες από τις τεχνολογίες xDSL που αναπτύσσονται σήμερα δεν υποστηρίζουν τις προβλεπόμενες απαιτήσεις εύρους ζώνης από κάθε θέση κυψέλης. Παρόλο που ορισμένες από τις επερχόμενες τεχνολογίες xDSL μπορεί να υποστηρίζουν υψηλότερους ρυθμούς, η εμβέλεια μπορεί να μην είναι αρκετή για να εγγυηθεί συνεπή κάλυψη εντός ενός τμήματος RAN.

Με βάση τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι προφανές ότι, παρόλο που υπάρχουν οικονομικά πλεονεκτήματα για την παροχή RAN backhaul μέσω xDSL, η ευρείας κλίμακας ανάπτυξη είναι μάλλον απίθανη έως ότου επιλυθούν οι συγκεκριμένες τεχνικές προκλήσεις.

Εκτός από τη χρήση μακροκυψελωτών RAN backhaul, οι τεχνολογίες DSL θα χρησιμοποιηθούν επίσης για την παροχή backhaul από τους οικιακούς κόμβους (HNB - Home NodeBs), γνωστούς και ως femtocells.

5.4 LTE: ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ IP

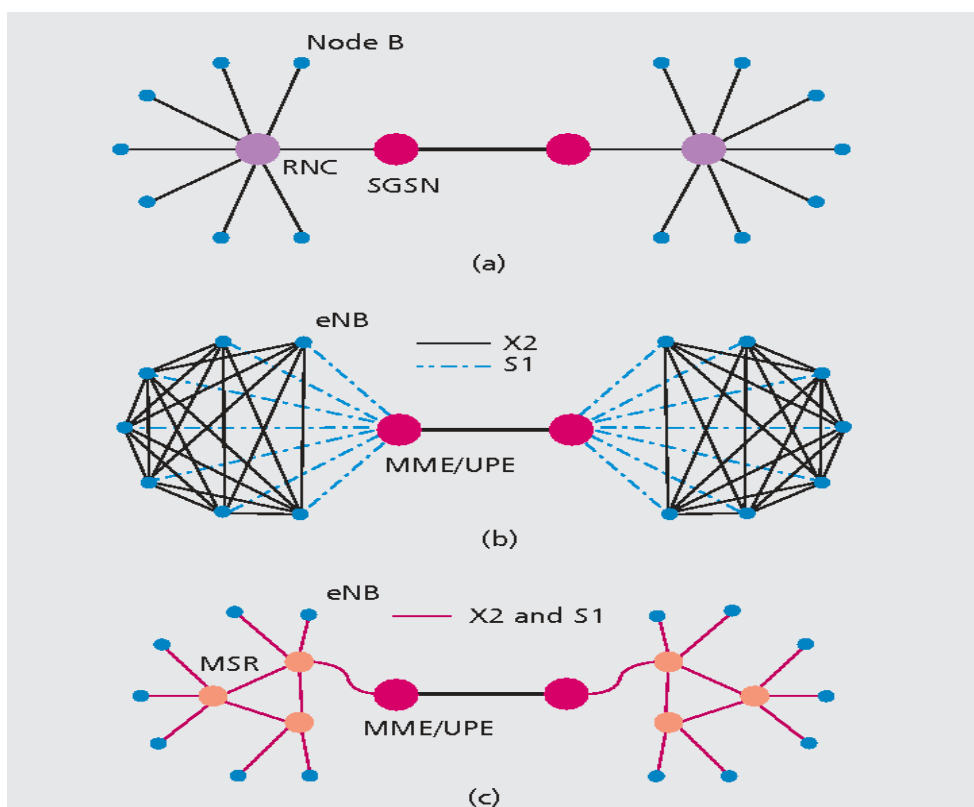
Η τρέχουσα τυποποίηση στο πλαίσιο της 3GPP για την αρχιτεκτονική R7 γίνεται από δύο ομάδες εργασίας: LTE, με επίκεντρο τις προδιαγραφές του E-UTRAN [29] και Εξέλιξη Αρχιτεκτονικής Συστήματος (SAE - System Architecture Evolution), η οποία έχει την εντολή να εξελίξει τον πυρήνα πακέτων του 3GPP ώστε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του E-UTRAN [30]. Συγκεκριμένα, οι απαιτήσεις που επιβάλλονται στο E-UTRAN είναι η παροχή μέγιστων ρυθμών δεδομένων κατερχόμενης

(downlink) ζεύξης της τάξης των 100 Mbps εντός μιας ζώνης 20 MHz και η καθυστέρηση επιπέδου χρήστη μικρότερη από 5 ms. Παρομοίως, η πρόταση της SAE αφορά έναν τομέα μεταγωγής πακέτων (PS - Packet Switched) ολοκληρωτικά βασισμένο στο IP για την υποστήριξη υπηρεσιών φωνής και δεδομένων, καθώς και διεπαφές με πολλαπλές τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης (RATs - Radio Access Technologies), όπως GERAN (GSM EDGE Radio Access Network), UTRAN και WLAN (Wireless Local Access Network).

Από τη σκοπιά του backhaul, το LTE αποτελεί σημαντική παρέκκλιση από τα συμβατικά GERAN και UTRAN. Οι κύριες διαφορές είναι οι απαιτήσεις για πλήρη συνδεσιμότητα λογικού πλέγματος μεταξύ των ενισχυμένων κόμβων B (eNBs - enhanced Node Bs) (διεπαφή X2) και άμεσες συνδέσεις από κάθε eNB σε τουλάχιστον δύο οντότητες διαχείρισης κινητικότητας (MME - Mobility Management Entity) επιπέδου χρήστη (UPE - User Plane Entity) (διεπαφή S1). Ο διαχωρισμός των διεπαφών X2 και S1 επιτρέπει τη βέλτιστη δρομολόγηση της κίνησης του χρήστη και του επιπέδου ελέγχου με βάση ένα συγκεκριμένο σενάριο κινητικότητας. Για παράδειγμα, για τη διαχείριση των μεταγωγών εντός των eNB, η κίνηση του επιπέδου χρήστη μπορεί να διασχίζει μια διεπαφή X2 με τα αντίστοιχα μηνύματα διαχείρισης κινητικότητας (επίπεδο ελέγχου) να υποκλέπτονται από την MME μέσω μιας διασύνδεσης S1. Από την άλλη πλευρά, για την διαχείριση της κινητικότητας μεταξύ δύο ξεχωριστών τομέων MME, το επίπεδο χρήστη καθώς και η κίνηση του επιπέδου ελέγχου μπορεί να διασχίζουν μια διεπαφή S1.

Για να τονιστούν οι διαφορές μεταξύ των συμβατικών αρχιτεκτονικών και των αρχιτεκτονικών backhaul LTE, το Σχήμα 5.2 επιχειρεί να μοντελοποιήσει δύο υποτυπώματα ενός RAN, το καθένα με μια ομάδα Node Bs που διασυνδέονται μέσω κατάλληλων στοιχείων δικτύου που υπαγορεύονται από μια συγκεκριμένη αρχιτεκτονική RAN. Στην περίπτωση του UTRAN (Σχήμα 5.2α), το μοντέλο δικτύου backhaul μοιάζει με ένα λογικό γράφημα κόμβου-ακτίνας, με το RNC ως κόμβο και τους Node Bs ως ακτίνες. Στη συνέχεια, οι δύο RNC διασυνδέονται μέσω των αντίστοιχων εξυπηρετούντων κόμβων υποστήριξης GPRS (SGSN - Servicing GPRS Supporting Nodes), αντιπροσωπεύοντας έναν απλουστευμένο τομέα PS. Το ίδιο δίκτυο που μεταφέρθηκε στην αρχιτεκτονική E-UTRAN παρουσιάζεται στην εικόνα 5.2(β). Συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.2(α) και 5.2(β), είναι αρκετά εύκολο να εντοπιστούν οι κύριες διαφορές μεταξύ των απαιτήσεων backhaul αυτών των αρχιτεκτονικών.

Υπάρχουν πολλαπλές μέθοδοι για το σχεδιασμό ενός σχήματος backhaul που μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις που επιβάλλει το LTE/SAE και ταυτόχρονα είναι αρκετά κλιμακούμενο ώστε να μειώσει το κόστος υλοποίησης. Ένα τέτοιο σχήμα, βασισμένο σε IP-εικονικών ιδιωτικών δικτύων (IP VPNs - Virtual Private Networks) που υλοποιούνται μέσω MSRs, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2γ.



Σχήμα 5.2: (α) Λογικό γράφημα για το UTRAN backhaul, (β) λογικό γράφημα για το E-UTRANbackhaul και (γ) σχήμα υλοποίησης για το LTE backhaul μέσω IP- VPN με δυνατότητα MSR [6].

Σημειώνεται ότι για λόγους σαφήνειας, απεικονίζεται μόνο ένα σύνολο συνδέσεων S1 στο Σχήμα 5.2 (β).

Μερικά από τα προφανή πλεονεκτήματα που σχετίζονται με αυτό το σχήμα είναι:

- Μείωση της πολυπλοκότητας: Οι αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου και τη σχετική συνδεσιμότητα απαιτούν λειτουργίες $O(n)$, σε αντίθεση με $O(n^2)$ εάν δεν χρησιμοποιούνται IP-VPN.
- Βέλτιστη χρήση των πόρων: Διατήρηση του πλήρους εικονικού διαχωρισμού των διεπαφών X2 και S1.

Εκτός από την επίλυση ζητημάτων επεκτασιμότητας, τα VPN παρέχουν επίσης ασφάλεια του τομέα δικτύου, ιδίως σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται μισθωμένη

backhaul σε κοινόχρηστη υποδομή. Η ανάγκη για ασφάλεια τομέα δικτύου προκύπτει λόγω της ανοικτής αρχιτεκτονικής IP που υιοθετείται σε ένα πλαίσιο LTE/SAE. Θεωρείται ότι η μετάβαση σε πρωτόκολλα και διεπαφών βασισμένες σε IP θα οδηγήσει σε αυξημένη πιθανότητα απειλών ασφάλειας από το εσωτερικό και το εξωτερικό των κινητών δικτύων.

Βιβλιογραφία

- [1] T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney, Jr., A. F. Molisch, E. Melios, J. Zhang, “Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth Generation (5G) Wireless Networks-with a focus on Propagation Models,” in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Special Issue on 5G, Nov. 2017.
- [2] A.Ghosh et al., “Millimeter-wave enhanced local area systems: A high-data-rate approach for future wireless networks,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 32, no. 6, pp. 1152–1163, June 2014.
- [3] S. Hur et al., “Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks,” IEEE Transactions on Communications, vol. 61, no. 10, pp. 4391–4403, Oct. 2013.
- [4] C.-X.Wang et al., “Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks,” IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, pp. 122–130, Feb. 2014.
- [5] Federal Communications Commission, “Spectrum Frontiers Report and Order and Further Notice of Proposed Rulemaking: FCC16-89,” July 2016.
- [6] H.Raza, “A brief survey of radio access network backhaul evolution: part I,” IEEE Communications Magazine, vol. 49, no. 6, pp. 164–171, June 2011.
- [7] H. Raza, J. Networks, “A brief survey of radio access network backhaul evolution: part II,” IEEE Communications Magazine, vol. 51, no. 5, pp. 170–177, May 2013.
- [8] M. Jaber et al., “5G Backhaul Challenges and Emerging Research Directions: A Survey,” IEEE Access, no. 4, pp. 1743–1766, May 2016.
- [9] X. Ge et al., (2014) “5G wireless backhaul networks: challenges and research advances,” IEEE Network, vol. 28, no. 6, pp. 6–11, Dec. 2014.
- [10] Infonetics Research. (Nov. 2014). Carrier SDN and NFV Hardware and Software: Aannual Market Size and Forecasts. [Online]. Available: <http://www.info-netics.com/pr/2014/Carrier-SDN-NFV-Market-Highlights.asp>
- [11] D. Bojic et al., “Advanced wireless and optical technologies for small-cell mobile backhaul with dynamic software-dened management,” IEEE Commun. Mag., vol. 51, no. 9, pp. 86-93, Sep. 2013.

- [12] S. Tombaz, P. et al., "Is backhaul becoming a bottleneck for green wireless access networks?" in Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC), pp. 4029-4035. Jun. 2014.
- [13] A. Mesodiakaki et al., "Energy impact of outdoor small cell backhaul in green heterogeneous networks," in Proc. IEEE 19th Int. Workshop Comput. Aided Modeling Design Commun. Links Netw. (CAMAD), pp. 11-15, Dec. 2014.
- [14] ITU-R P.837-6, "Characteristics of precipitation for propagation modelling," Geneva 2012.
- [15] ITU-R P.838-3, "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods," 2005.
- [16] Arapoglou, P.-D., Panagopoulos, A. and Cottis, P., "An Analytical Prediction Model of Time Diversity Performance for Earth-Space Fade Mitigation", International Journal of Antennas and Propagation, Jan. 2008.
- [17] A. F. Ismail and P. A. Watson, "Characteristics of fading and fade countermeasures on a satellite-Earth link operating in an equatorial climate, with reference to broadcast applications," IEE Proceedings: Microwaves, Antennas and Propagation, vol. 147, no. 5, pp. 369–373, Oct. 2000.
- [18] J. Tan and L. Pedersen, "Study of simultaneous coverage and route diversity improvement under rainy periods for LMDS systems at 42 GHz," in Proc. ESA Millenium Conf. Antennas and Propagation, vol. AP2000, Davos, Switzerland, Apr. 2000.
- [19] G. Hendratoro, R. J. C. Bultitude, and D. D. Falconer, "Use of cell-site diversity in millimeter-wave fixed cellular systems to combat the effects of rain attenuation 602–614," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 20, pp. 602–614, Apr. 2002.
- [20] A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, "Cell-site diversity performance of millimeter-wave fixed cellular systems operating at frequencies above 20 GHz," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 1, pp. 183-185, July 2002.
- [21] K. P. Liolis, A. D. Panagopoulos and P. -D. M. Arapoglou, "An analytical unifying approach for outage capacity achieved in SIMO and MISO broadband satellite channel configurations," *2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation*, pp. 2911-2915, June 2009.
- [22] V. K. Sakarellos, C. I. Kourogorgas and A. D. Panagopoulos, "Hybrid satellite-terrestrial broadband backhaul links: Capacity enhancement through spatial

multiplexing," *2012 IEEE First AESS European Conference on Satellite Telecommunications (ESTEL)*, pp. 1-5, Jan 2012.

[23] R. Chen, W.-X. Long, G. Mao, and C. Li, "Development trends of mobile communication systems for railways," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 3131–3141, 2018.

[24] B. Ai et al., "Future railway services-oriented mobile communications network," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 10, pp. 78–85, Oct. 2015.

[25] X. Wang, "Moving relays in downlink multiuser networks—A physical-layer security perspective," in *Proc. IEEE 87th Veh. Technol. Conf. (VTC Spring)*, Porto, Portugal, 2018, pp. 1–5.

[26] A. Alzidaneen, A. Alsharoa, and M.-S. Alouini, "Resource and placement optimization for multiple UAVs using backhaul tethered balloons," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 9, no. 4, pp. 543–547, Apr. 2020.

[27] N. Zhao et al., "Caching UAV assisted secure transmission in hyper-dense networks based on interference alignment," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 5, pp. 2281–2294, May 2018.

[28] "Encapsulation Methods for Transport of Ethernet over MPLS Networks," IETF RFC 4448, Apr. 2006.

[29] "Feasibility Study for Evolved Universal Terrestrial Radio Access and UTRAN; Release 7," 3GPP TR25.912, Sept. 2006.

[30] "3GPP System Architecture Evolution: Report on Technical Options and Conclusions (Release 7)," 3GPP TR23.882, Sept. 2006.