

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

-Κατανομή των πόρων και Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων σε Δορυφορικά Δίκτυα Επικοινωνιών-

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

της

ΔΙΟΝΥΣΙΑΣ Κ. ΠΕΤΡΑΚΗ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2005)

Αθήνα, -Μάιος 2009-



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑ-ΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ -Εφγαστήφιο Ασυφμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων-

-Κατανομή των πόθων και Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων σε Δοθυφορικά Δίκτυα Επικοινωνιών-

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

της

-ΔΙΟΝΥΣΙΑΣ Κ. ΠΕΤΡΑΚΗ-Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού

και Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2005)

Συμβουλευτική Επιτροπή: Παναγιώτης, Γ. Κωττής Ιωάννης, Δ Κανελλόπουλος Χρήστος, Καψάλης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 11η Μαίου 2009.

Π.Κωττής Καθηγητής ΕΜΠ

Καθηγητής ΕΜΠ

Χ.Καψάλης Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Σ.Παπαβασιλείου Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Φ.Κωνσταντίνου Καθηγητής ΕΜΠ

Ι.Κανελλόπουλος

Β.Τσαουσίδης Καθηγητής ΔΠΘ

Α.Κανάτας Αναπλ. Καθηγητής Παν. Πειραιώς

Αθήνα, -Μάιος 2009-

ΔΙΟΝΥΣΙΑ Κ. ΠΕΤΡΑΚΗ

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

c Διονυσία Κ. Πετράκη, 2009. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περιεχόμενα

1	Mei	τάδοση	ι Δεδομένων σε Δορυφορικά Δίκτυα Επικοινωνιών	20	
	1.1	Δορυσ	ρορικές Επικοινωνίες	20	
		1.1.1	Βασικά προβλήματα στη σχεδίαση δορυφορικών συστημάτων επικοινωνιών	25	
		1.1.2	Σχήματα Πολλαπλής Προσπέλασης	27	
	1.2 Υπηρεσίες Διαδικτύου			31	
		1.2.1	Προφίλ κίνησης	31	
		1.2.2	Τοπολογίες Δικτύου	31	
		1.2.3	Παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας	33	
		1.2.4	Ποιότητα Υπηρεσίας σε δορυφορικές υπηρεσίες κίνησης διαδικτύου	34	
		1.2.5	Κατηγορίες κίνησης πολυμέσων ανάλογα με την ποιότητα υπηρεσίας	38	
		1.2.6	Παράμετροι επίδοσης δικτύου IP	38	
2	Пęć	ότυπα	Δορυφορικών Δικτύων	40	
	2.1	Εισαγ	ωγή	40	
	2.2	Αρχιτ	εκτονική Δικτύου	41	
	2.3	Το πα	ρότυπο DVB-S	43	
	2.4	Το πα	ρότυπο DVB-S2	45	
	2.5	Το πα	ρότυπο DVB-RCS	49	
		2.5.1	Διαίφεση της Χωφητικότητας	51	
		2.5.2	Μηχανισμοί ικανοποίησης αιτημάτων κίνησης στο DVB-RCS	58	
		2.5.3	Κατηγορίες αιτημάτων για κατανομή των πόρων	58	
		2.5.4	Στρατηγικές Αιτημάτων Χωρητικότητας	62	
		2.5.5	Σηματοδοσία	63	
3	Δυναμική Κατανομή των πόρων σε Δορυφορικά Δίκτυα Επικοινωνιών				
	3.1	Εισαγ	ωγή-Επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας	68	
		3.1.1	Δυναμική κατανομή των πόρων-Ορισμός του προβλήματος	68	
		3.1.2	Δυναμικοί Αλγόριθμοι Κατανομής των πόρων	70	
		3.1.3	Δυναμική κατανομή των πόρων ως πρόβλημα βελτιστοποίησης	74	
		3.1.4	Δυναμική κατανομή των πόρων με διαστρωματική προσέγγιση	77	
		3.1.5	Κεντρικά ελεγχόμενοι και Κατανεμημένοι Αλγόριθμοι κατανομής των πόρων	80	
	3.2	2 Σύνοψη του Προτεινόμενου Αλγορίθμου		82	
	3.3	3 Ανάλυση Φυσικού Στρώματος		84	
	3.4	4 Υπολογισμός των πόρων		86	
		3.4.1	Αλγόριθμος από την πλευρά των τερματικών	87	
		3.4.2	Αλγόριθμος από την πλευρά του κέντρου ελέγχου (NCC)	88	
		3.4.3	Αλγόριθμος Πολλαπλών Μερικών Αθροισμάτων	89	
	3.5	Εκχώ	ρηση των Πόρων	91	
		3.5.1	Περιγραφή του προβλήματος	91	
		3.5.2	Υβριδικός Αλγόριθμος Bin-packing	92	

	3.6	Προσα	ρμοιώσεις και Αριθμητικά Αποτελέσματα	97
		3.6.1	Περιβάλλον Προσομοίωσης	97
		3.6.2	Φάση Υπολογισμού των Πόρων	97
		3.6.3	Φάση Εκχώρησης των Πόρων	99
4	Έλε	εγχος Α	Αποδοχής Κλήσεων υπό Συνθήκες Διαλείψεων	102
	4.1	Εισαγα	ωγή-Επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας	102
	4.2	Αλγόϱ	ιθμος υπολογισμού των πόρων υπό συνθήκες διαλείψεων	106
	4.3	Πιθαν	ότητα μη αποδοχής κλήσεων: Η Περίπτωση μιας κλάσης υπηρεσιών	109
		4.3.1	Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες καθαφού ουφανού	109
		4.3.2	Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες διαλείψεων	110
		4.3.3	Άνω όριο μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες διαλείψεων	112
	4.4	Πιθαν	ότητα μη αποδοχής κλήσεων: Η περίπτωση δύο κλάσεων υπηρεσιών	113
		4.4.1	Περιγραφή του σχήματος ελέγχου αποδοχής κλήσεων	113
		4.4.2	Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες καθαφού ουφανού	115
		4.4.3	Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες διαλείψεων	117
		4.4.4	Όρια της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες διαλείψεων	121
	4.5	ТСР ′І	Ελεγχος Αποδοχής Κλήσεων	123
		4.5.1	Ανάλυση Επίδοσης της Πιθανότητας μη αποδοχής Κλήσεων	124
	4.6	Αϱιθμι	ητικά Αποτελέσματα	125
		4.6.1	Περίπτωση μιας κλάσης υπηρεσίας	126
		4.6.2	Περίπτωση δύο κλάσεων υπηρεσιών	127
5	Κατ	τανεμηι	μένοι Αλγόριθμοι Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων	136
	5.1	Εισαγα	ωγή	136
	5.2	Έλεγχ	ος Αποδοχής Κλήσεων με εφαρμογή της Θεωρίας Παιγνίων	138
		5.2.1	Το παίγνιο εκχώρησης πόρων μεταξύ δύο παικτών	138
		5.2.2	Η ανάγκη ύπαρξης πολλών κλάσεων υπηρεσιών	141
		5.2.3	Επέκταση σε Ν-παίκτες	141
		5.2.4	Περιγραφή του αλγορίθμου αποδοχής κλήσεων	142
	5.3	Ανάλυ	υση επίδοσης του Αλγορίθμου Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων	143
		5.3.1	Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες καθαφού ουφανού	144
		5.3.2	Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες διαλείψεων	145
		5.3.3	Όρια της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες διαλείψεων	146
	5.4	Απλός	ς Κατανεμημένος Αλγόριθμος Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων	148
	5.5	Αqιθμι	ητικά αποτελέσματα	150
		5.5.1	Αλγόριθμος με Χρήση Θεωρίας Παιγνίων	152
		5.5.2	Απλός Κατανεμημένος Αλγόριθμος	156

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Αρχιτεκτονική δικτύου DVB.	42
2.2	Λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα του συστήματος DVB-S.	43
2.3	Πολύπλεξη και δομή πλαισίου μετάδοσης.	45
2.4	Λειτουργικό διάγραμμα μιας ζεύξης DVB-S2 με ACM.	46
2.5	Υποσύστημα μετάδοσης του προτύπου DVB-S2.	47
2.6	Τυπικό παράδειγμα υπερπλαισίων σε ένα Διαδραστικό δορυφορικό δίκτυο.	52
2.7	Παράδειγμα δομής υπερπλαισίου.	53
2.8	Παράδειγμα δομής πλαισίου.	54
2.9	Διαίρεση της συνολικής χωρητικότητας στο σύστημα DVB-RCS ανά υπερπλαίσια,	
	πλαίσια και χρονοσχισμές	55
2.10	Παράδειγμα σύνθεσης πλαισίου.	57
3.1	Γραφική παράσταση του PER συναρτήσει του E_b/n_0 για μέγεθος πλαισίου ίσο με	
	1Mbit.	85
3.2	Δυναμικός προσδιορισμός δομής υπερπλαισίων χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο	
	αλγόριθμο πολλαπλών μερικών αθροισμάτων	90
3.3	Ποσοστό μη χρησιμοποίησης (NU) συναρτήσει του πλήθους των τερματικών u (c =	
~ .	70, $s = 60, l = 20$)	93
3.4	Ποσοστό μη χρησιμοποίησης (NU) συναρτήσει του πλήθους των φερόντων c (s =	
~ -	$80, \ l = 40, \ u = 1000)$	94
3.5	Ποσοστό μη χρησιμοποίησης (NU) συναρτήσει του πλήθους των χρονοσχισμών s	
	(c = 70, l = 30, u = 1500)	94
3.6	Ποσοστό μη χρησιμοποίησης (NU) συναρτήσει του μέγιστου φορτίου l (c = 100, s =	~ -
~ -	100, u = 1500)	95
3.7	Μη χρησιμοποιούμενες χρονοσχισμές συναρτήσει του χρόνου με τη χρήση ή όχι του	0.0
	αλγορίθμου πολλαπλών μερικών αθροισμάτων	98
3.8	Γραφική παράσταση του κανονικοποιημένου ποσοστού μη χρησιμοποιούμενων πό-	0.0
0.0	ρων συναρτήσει του αριθμού εκτέλεσης των τριών αλγορίθμων κατάνομής των πόρων.	98
3.9	Ποσοστό μη χρησιμοποίησης συναρτήσει του πληθους των χρηστών όπως προκύ-	100
0.10	πτει από την προσομοίωση και τις αναλυτικές εκφράσεις	100
3.10	Σταθμισμένο ποσοστό μη χρησιμοποίησης NU ανά χρήστη λ για τους τρεις αλγο-	
	c είθμους τοποθέτησης σε δοχεία (Υβριδικός, Best-Fit και RCP-Fit) για $s = 32, c \in C$	100
0.11	$\{40, 50, 60\}, l \in \{8, 16, 24, 32, 48\}$	100
3.11	Σταθμισμένο ποσοστό μη χρησιμοποίησης NU ανά χρήστη λ για τους τρεις αλγο-	
	$c \in C$ είθμους τοποθέτησης σε δοχεία (Υβριδικός, Best-Fit και RCP-Fit) για $s = 48, c \in C$	404
	$\{40, 50, 60\}, l \in \{8, 16, 24, 32, 48\}$	101
4.1	Εκτίμηση του επιπέδου απόσβεσης για διαφορετικές τιμές της πιθανότητας Pour	108
4.2	Αλυσίδα Markov νια το προτεινόμενο σγήμα αποδογής κλήσεων υπό συνθήκες	100
	διαλείψεων στην περίπτωση μιας κλάσης υπηρεσίας	111
4.3	Αλυσίδα Markov δύο διαστάσεων για το προτεινόμενο σγήμα αποδογής κλήσεων.	116
-		

4.4	Κλάσμα πρόσθετων πόρων συναρτήσει της απόσβεσης A για διαφορετικές τιμές του M_{th}	125
4.5	Πιθανότητα μη αποδοχής συναρτήσει του λ/μ , για δύο διακριτούς ρυθμούς μετά-	10.0
4.6	δοσης για την περιοχή της Αθήνας, $T_S = 2sec.$	126 127
4.7	Αλυσίδα Markov που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή αριθμητικών αποτελεσμάτων R^{RT}	.128
4.0	$[\lambda^{NRT}=0.2, \ \mu^{RT}=\mu^{NRT}=1/60, \ f=30 \text{GHz}].$	129
4.9	Πιθανότητα μη αποδοχής για τις υπηρεσίες RT και NRT συναρτήσει του λ^{NRT} $[(\lambda/\mu)^{RT} = 1/60, \mu^{RT} = \mu^{NRT} = 1/60, f=30 \text{ GHz}].$	130
4.10	Πιθανότητα μη αποδοχής για τις υπηρεσίες RT και NRT συναρτήσει του T_S [$\lambda^{RT} = 0.1$ $\lambda^{NRT} = 0.2$ $\mu^{RT} = \mu^{NRT} = 1/60$ f=30GHz]	130
4.11	Avω όριο της πιθανότητας μη αποδοχής για τις υπηρεσίες RT και NRT συναρτήσει του λ^{RT} για διάφορες τιμές της συχνότητας $[\lambda^{NRT} = 0.2, \mu^{RT} = \mu^{NRT} = 1/60, f=30]$	100
<i>A</i> 19	GHz]	132
4.10	πιθανότητας απόρριψης P_d για διάφορες τιμές του T_S [$\lambda^{RT} = 0.1, f=30$ GHz]	133
4.13	Mesos aquellos NRI xonstav suvaquisti tou λ^{RI} [$\lambda^{RRI} = 0.2$, $\mu^{RRI} = \mu^{RI} = 1/60s$, $f=30$ GHz].	133
4.14	Mésos αριθμός RT χρηστών συναρτήσει του $(\lambda/\mu)^{NRT}$ [λ^{RT} =0.1, μ^{NRT} = μ^{RT} = 1/60s, f=30GHz].	134
5.1	Υπολογισμός του $ au_m$	149
5.2	Αφιθμός χρονοσχισμών που εκχωρούνται ανά χρήστη	151
5.3 5.4	Πλήθος χρηστών που εξυπηρετούνται συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων συναρτήσει του παράγοντα δ υπό συνθήκες καθαρού ουρανού και υπό συνθήκες διαλείψεων, ρυθμός μετάδοσης = 1024kbps,	151
	$\lambda/\mu = 0.5, T_S = 1sec.$	153
5.5	Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων συνα ρτήσει της διάρκειας T_S υπό συνθήκες καθαρού ουρανού και υπό συνθήκες διαλείψεων (ρυθμός μετάδοσης=1024kbps, δ =	
5.6	0.9)	154
	$T_{\rm S} = 10 sec, \delta = 0.8$	154
5.7	Μέσος αριθμός χρηστών συναρτήσει του παράγοντα δ ($T_S = 10 sec$, $\lambda/\mu = 10$, ρυθμός μετάδοσης=1024kbps).	155
5.8	Μέσος αριθμός χρηστών συναρτήσει του λ/μ , υπό συνθήκες καθαρού ουρανού και	100
59	υπό συνθήκες διαλείψεων ($T_s = 60 \sec, \delta = 0.8$, ουθμός μετάδοσης=1024kbps) Κανονικοποιημένος αριθμός μη αποδεκτών κλήσεων συναρτήσει του λ/μ για την	155
0.9	περιοχή της Αθήνας ($P_{out} = 10^{-4}$, f=20GHz, $PER_{th} = 10^{-3}$).	157
5.10	Κανονικοποιημένος αριθμός μη αποδεκτών κλήσεων συναρτήσει του $1/\mu$ για την περιοχή της Αθήνας ($P_{out} = 10^{-4}$, f=28GHz), $PER_{th} = 10^{-3}$.	157

Κατάλογος Πινάκων

1.1	Κατηγορίες ποιότητας υπηρεσίας ΙΡ σύμφωνα με τη Σύσταση ΙΤU-Τ Υ.1541	38
2.1	Σύνθεση πλαισίου.	57
3.1	Λόγος σήματος προς θόρυβο συναρτήσει του PER	86
4.1	Τοποθεσίες των Χρηστών για την εξαγωγή αριθμητικών αποτελεσμάτων	129
5.1	Τοποθεσίες των Χρηστών για την εξαγωγή αριθμητικών αποτελεσμάτων.	150

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια του Εργαστηρίου Ασυρμάτου Επικοινωνιών Μεγάλων Αποστάσεων του Τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών στα πλαίσια των υποχρεώσεων του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της διατριβής αποτελεί η διαστρωματική μελέτη των προβλημάτων που συνδέονται με τη Διαχείριση των Πόρων σε Δορυφορικά Δίκτυα Επικοινωνιών, τα σημαντικότερα εκ των οποίων είναι η Κατανομή των Πόρων και ο Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων. Στόχος της διατριβής είναι η παρουσίαση τεχνικών βελτιστοποίησης και η εξαγωγή αναλυτικών αποτελεσμάτων για παραμέτρους που άπτονται των συγκεκριμένων προβλημάτων.

Συγκεκριμένα, το πρώτο Κεφάλαιο της Διατριβής παρέχει μια γενική επισκόπηση των δορυφορικών επικοινωνιών, με στόχο να επισημανθούν τα χαρακτηριστικά των δορυφορικών δικτύων που τα καθιστούν ελκυστικά έναντι άλλων τύπων δικτύων, τα εγγενή τους προβλήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη σχεδίαση πρωτοκόλλων για τα δίκτυα αυτά και τα σχήματα πολλαπλής προσπέλασης που χρησιμοποιούνται. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται για τις υπηρεσίες IP και τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας που προδιαγράφουν. Στο δεύτερο Κεφάλαιο της Διατριβής δίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά των δορυφορικών προτύπων της οικογένειας DVB, που στοχεύουν στην ενοποίηση υπηρεσιών και συστημάτων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις τεχνικές αντιστάθμισης των διαλείψεων που προδιαγράφουν, καθώς και στις προδιαγραφές που τίθενται για τη βέλτιστη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης με στόχο την υποστήριξη των διαρκώς αναπτυσσόμενων υπηρεσιών IP.

Στο τρίτο Κεφάλαιο της Διατριβής πραγματοποιείται εκτενής επισκόπηση των αλγορίθμων που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για την επίλυση του προβλήματος κατανομής των πόρων σε δορυφορικά δίκτυα επικοινωνιών. Στη συνέχεια, προτείνεται ένα νέο σχήμα κατανομής των πόρων με διαστρωματική προσέγγιση. Το πρόβλημα διαιρείται σε δύο διακριτά επιμέρους προβλήματα: τον υπολογισμό των πόρων και την εκχώρηση των πόρων. Στο πρώτο προτείνεται ένας αλγόριθμος μερικών πολλαπλών αθροισμάτων για τη δυναμική οργάνωση των υπερπλαισίων, ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις δυναμικές ιδιότητες του διαύλου παρουσία διαλείψεων. Στο δεύτερο εισάγεται ένας υβριδικός αλγόριθμος τοποθέτησης σε δοχεία (Bin-packing) για την οργάνωση των αιτήσεων στο πλαίσιο, ο οποίος επιτυγχάνει τη μεγιστοποίηση της διέλευσης του συστήματος, ενώ παρέχονται τύποι υπολογισμού της διέλευσης του συστήματος συναρτήσει των παραμέτρων του δικτύου.

Τα υπόλοιπα Κεφάλαια μελετούν το πρόβλημα ελέγχου αποδοχής κλήσεων. Ύστερα από μια εκτενή παρουσίαση των κατηγοριών των αλγορίθμων που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία, προτείνονται αλγόριθμοι ελέγχου αποδοχής κλήσεων οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τις διαλείψεις του διαύλου και αποσκοπούν στην εξασφάλιση καθορισμένου επιπέδου ποιότητας υπηρεσίας των παρεχόμενων υπηρεσιών. Στο Κεφάλαιο 4 προτείνονται κεντρικά ελεγχόμενοι αλγόριθμοι, ενώ στο Κεφάλαιο 5 αντίστοιχοι κατανεμημένοι αλγόριθμοι με χρήση της θεωρίας παιγνίων. Η επίδοση των προτεινομένων αλγορίθμων πραγματοποιείται με χρήση Μαρκοβιανού μοντέλου και παρέχονται αναλυτικοί τύποι για την πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων. Αξίζει

10

να σημειωθεί ότι τα προτεινόμενα σχήματα με διαστρωματική προσέγγιση και ο τρόπος μοντελοποίησής τους μπορούν να εφαρμοσθούν γενικά σε ασύρματα δίκτυα υπό συνθήκες διαλείψεων.

Επί τη λήξει της διδακτορικής μου πορείας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε μια σειρά ανθρώπων που στάθηκαν δίπλα μου και με στήριξαν στην πορεία μου μέχρι σήμερα. Καταρχήν θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή τόσο της διδακτορικής μου διατριβής όσο και της διπλωματικής μου εργασίας κ. Παναγιώτη Γ.Κωττή. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου όλα αυτά τα χρόνια, την αμέριστη συμπαράστασή του, τη πολύτιμη καθοδήγησή του, την επιμονή και υπομονή του σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής. Οι υψηλές επιστημονικές του αξίες, η αγάπη του για την ορθή και λακωνική χρήση της γλώσσας, οι βαθιές επιστημονικές του γνώσεις και η μεταδοτικότητά του ως δάσκαλος έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωσή μου ως Μηχανικό Επικοινωνιών και μου ενέπνευσαν την αγάπη για την έρευνα και την επιστήμη των επικοινωνιών.

Τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω και προς τους καθηγητές μου Ιωάννη Δ. Κανελλόπουλο, Χρήστο Ν. Καψάλη, Συμεών Παπαβασιλείου και Φίλιππο Κωνσταντίνου. Η άρτια επιστημονική τους κατάρτιση και η αγάπη τους για το αντικείμενο διδασκαλίας τους μου ενέπνευσαν την αγάπη για μάθηση και έρευνα.

Ιδιαίτεφες ευχαφιστίες θα ήθελα να εκφφάσω στον αγαπημένο μου φίλο και συνεφγάτη Μάφκο Π. Αναστασόπουλο. Θα ήθελα να τον ευχαφιστήσω μέσα από την καφδιά μου για την άφιστη συνεφγασία μας, την καθοδήγησή του, τις πολύτιμες συμβουλές του, τη διαφκή ψυχική στήφιξη και ενθάφφυνσή μου σε όλη τη διάφκεια της διδακτοφικής μου διατφιβής και την αλληλοσυμπαφάστασή μας στην κοινή μας ποφεία. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαφιστήσω για τις πολυάφιθμες ώφες εφευνητικών αναζητήσεων που έκαναν το διδακτοφικό μου ταξίδι πιο ευχάφιστο. Η σφαιφική του άποψη για πολλά θέματα που άπτονται των τηλεπικοινωνιών, οι εποικοδομητικές συζητήσεις μας και η ανταλλαγή απόψεων έδωσαν αποτελεσματικές λύσεις στο εφευνητικό μου έφγο.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποιους ακόμα ανθρώπους από το εργαστήριο. Καταρχήν, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Λέκτορα Αθανάσιο Δ. Παναγόπουλο για τις πολύτιμες συμβουλές του κατά τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας και στα πρώτα βήματα της διδακτορικής μου διατριβής. Για την καθοδήγηση, την άριστη συνεργασία μας στο Υπουργείο και τη φιλία του θα ήθελα να ευχαριστήσω και το Διδάκτορα Παντελή Αράπογλου. Επίσης, ευχαριστώ τους Αρτέμη Βουλκίδη, Άννα Βαζιντάρη, Αθανάσιο Λαζαρόπουλο, Γιώργο Τσιρόπουλο, Αθανάσιο Δρούγκα, Αγγελική Σαράφη, Αγγελική Κορδαλή, Δημήτρη Στρατογιάννη, Βασίλη Σακαρέλλο και Δημήτρη Σκαπαρλή για τη φιλία τους και τη συνεργασία μας.

Σε προσωπικό επίπεδο, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου Κώστα και Νίτσα και την αγαπημένη μου αδερφή Κατερίνα για την αγάπη τους, την πίστη τους σε μένα, τη διαρκή τους στήριξη και ενθάρρυνση σε όλη την πορεία μου μέχρι σήμερα. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου Ειρήνη, Κατερίνα, Ζέτα, Μαρία, Νάσια και Σωτήρη για τις ξένοιαστες στιγμές και τη συμπαράστασή τους στα εύκολα και τα δύσκολα.

> Πετράκη Διονυσία, Αθήνα, Μάιος 2009

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτελεί η μελέτη των προβλημάτων Κατανομής Πόρων και του Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων σε Δορυφορικά Δίκτυα. Η έρευνα που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή λαμβάνει υπόψη τις προδιαγραφές των τεχνικών προτύπων που δημιουργήθηκαν τα τελευταία χρόνια για τα Δορυφορικά Δίκτυα.

Το 1ο Κεφάλαιο της Διατριβής παρέχει μια γενική επισκόπηση των δορυφορικών δικτύων με αναφορά στα εγγενή προβλήματα των δικτύων αυτών και τα σχήματα πολλαπλής προσπέλασης που χρησιμοποιούνται. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις υπηρεσίες IP και τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας που προδιαγράφουν. Στο 2ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται ανάλυση των τεχνικών προτύπων που έχουν προταθεί από την κοινοπραξία DVB για Δορυφορικά Δίκτυα. Ιδιαίτερη έμφαση αποδίδεται στις προδιαγραφές που θέτουν τα ανωτέρω πρότυπα για τη βέλτιστη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης με στόχο την υποστήριξη των διαρκώς αναπτυσσόμενων υπηρεσιών IP.

Στο Κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται εκτενής επισκόπηση των αλγορίθμων που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για την επίλυση του προβλήματος κατανομής των πόρων σε δορυφορικά δίκτυα επικοινωνιών. Στη συνέχεια, προτείνεται ένα νέο σχήμα κατανομής των πόρων. Το πρόβλημα διαιρείται σε δύο διακριτά επιμέρους προβλήματα: τον υπολογισμό των πόρων και την εκχώρηση των πόρων. Στο πρώτο προτείνεται ένας αλγόριθμος μερικών πολλαπλών αθροισμάτων για τη δυναμική οργάνωση των υπερπλαισίων, ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις δυναμικές ιδιότητες του διαύλου παρουσία διαλείψεων. Στη φάση της εκχώρησης των πόρων εισάγεται ένας υβριδικός αλγόριθμος τοποθέτησης σε δοχεία (Bin-packing) για την οργάνωση των αιτήσεων στο πλαίσιο, ο οποίος επιτυγχάνει τη μεγιστοποίηση της διέλευσης του συστήματος.

Στα υπόλοιπα κεφάλαια μελετάται το πρόβλημα του ελέγχου αποδοχής κλήσεων σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται επισκόπηση των κατηγοριών των αλγορίθμων ελέγχου αποδοχής κλήσεων που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Στη συνέχεια του κεφαλαίου προτείνονται κεντρικά ελεγχόμενοι αλγόριθμοι ελέγχου αποδοχής κλήσεων για δορυφορικά δίκτυα οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τις διαλείψεις του διαύλου και αποσκοπούν στην εξασφάλιση ενός επιπέδου ποιότητας υπηρεσίας των παρεχόμενων υπηρεσιών. Στο Κεφάλαιο 5 προτείνονται αντίστοιχοι κατανεμημένοι αλγόριθμοι με χρήση της θεωρίας παιγνίων. Η επίδοση των προτεινομένων αλγορίθμων πραγματοποιείται με χρήση Μαρκοβιανού μοντέλου και παρέχονται αναλυτικοί τύποι για την πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων.

ABSTRACT

The present thesis deals with problems related to Radio Resource Management, particularly to Resource Allocation and Call Admission Control in Satellite Networks. The relevant research is compliant with the specifications concerning the technical standards that have been proposed over the last years for Satellite Networks.

Chapter 1 provides an overview of satellite networks refering to their inherent characteristics and the multiple access schemes used. Emphasis is given on IP services and their Quality of Service requirements. In Chapter 2 a presentation of the technical standards that have been proposed by the DVB project for satellite networks is given. Special attention is given on the specifications of the standards concerning the optimal bandwidth utilization aiming at supporting continually evolving IP services.

In Chapter 3, a thorough survey of the algorithms that have been proposed in the literature to deal with resource allocation in satellite networks is provided. Next, a proposed resource allocation scheme is presented. The resource allocation problem is destinguished into two distinct phases: the resource calculation and the resource assignment. In the resource calculation phase, a multiple subset sum algorithm is introduced to specify the instants for the dynamic structure of superframes that takes into account the dynamic channel properties under fading conditions. In the resource assignment phase a novel Hybrid Bin-packing scheme is introduced to map requests onto the frame, which achieves maximization of system throughput.

The rest of the chapters deal with call admission control in wireless networks. Specifically, in Chapter 4 the algorithms proposed in the literature are clasified. An overview of the relevant categories is provided. In the rest of the chapter centralized call admission control algorithms are proposed that take into account the dynamic channel properties under fading conditions aiming at guaranteeing certain Quality of Service requirements for the applications supported. In Chapter 5, distributed algorithms based on game theory are introduced. The performance of the proposed algorithms is evaluated based on Markov model analysis and analytical expressions for call blocking probability are provided.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΜΗΣΕΩΝ

ABR	Available Bit Rate
ACM	Adaptive Coding and Modulation
AF	Assured Forwarding
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AVBDC	Absolute Volume Based Dynamic Capacity
BCH	Bose-Chaundhuri-Hocquenghem
BE	Best Effort
BER	Bit Error Ratio
BIP	Binary Integer Programming
BoD	Bandwidth on Demand
CAC	Call Admission Control
CBR	Constant Bit Rate
ССМ	Constant Coding Modulation
CDMA	Code Division Multiple Access
CF-DAMA	Combined Free and Demand Assignment Multiple Access
CMT	Correction Message Table
СР	Complete Partitioning
CRA	Continuous Rate Assignment
CS	Complete Sharing
CSC	Common Signaling Channel
DAMA	Demand Assignment Multiple Access
DBA	Dynamic Bandwidth Allocation
DiffServ	Differentiated Services
DSCP	DiffServ Code Point
DTH	Direct-To-Home
DVB	Digital Video Broadcasting
DVB-DSNG	Digital Video Broadcasting-Digital Satellite News Gathering
DVB-RCS	Digital Video Broadcasting-Return Channel Satellite
DVB-S	Digital Video Broadcasting via Satellite
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EF	Expedite Forwarding
FCA	Free Capacity Assignment
FCM	Fade Counter-Measures
FCT	Frame Composition Table
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FMT	Fade Mitigation Techniques
FTP	File Transfer Protocol
GB	Guaranteed Bandwidth
GEO	Geosynchronous Earth Orbit

GW	Gateway
IBR	In-band request
IRD	Integrated Receiver Decoders
IntServ	Integrated Services
IP	Internet Protocol
IPA	Infinitesimal Perturbation Analysis
IPTD	IP Packet Transfer Delay
IPDV	IP Packet Delay Variation
IPER	IP Packet Error Ratio
IPLR	IP Packet Loss Ratio
ISL	Inter-Satellite Link
ISP	Internet Service Providers
ITU	International Telecommunications Union - Telecom Standardization
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector
JT	Jitter Tolerant
LEO	Low Earth Orbit
LDP	Label Distribution Protocol
LDPC	Low Density Parity Check
LLA	Local Linear Approximation
LSP	Label Switched Path
LSR	Label Switched Routers
MAC	Medium Access Control
MEO	Medium Earth Orbit
MCPC	Multiple Channel per Carrier
MCR	Medium Cell Rate
MF-TDMA	Multi-Frequency Time Division Multiple Access
MPEG	Motion Picture Expert Group
MPLS	Multi-Protocol Label Switching
MPMP	Multipoint-to-Multipoint
MPP	Multipoint-to-Point
MSS	Mobile Satellite Service
NCC	Network Control Center
NCR	Network Clock Reference
NRT	Non Real Time
NU	Non Utilization
OBR	Out-of-band request
OC	Optimized Centralized
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OP	Optimized Proportional

PCR	Peak Cell Rate
PER	Packet Error Ratio
PHB	Per-Hop Behavior
PID	Packet Identifiers
PMP	Point-to-Multipoint
PP	Point-to-Point
PRBS	Pseudo-Random Binary Sequence
PRDAMA	PRedictive Demand Assignment Multiple Access
PRMA	Packet Reservation Multiple Access
PRRA	Predictive Resource Reservation Access
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RBDC	Rate Based Dynamic Capacity
RCST	Return Channel Satellite Terminal
RI	Reallocation Instants
RRM	Radio Resource Management
RS	Reed Solomon
RSVP	Resource Reservation Protocol
RT	Real Time
RTD	Round Trip Delay
RTT	Round Trip Time
SCR	Sustainable Cell Rate
SCT	Superframe Composition Table
SCPC	Single Channel per Carrier
SDMA	Spatial Division Multiple Access
SF	Superframe
SI	Service Information
SLA	Service Level Agreements
SMATV	Satellite Master Antenna Television
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SP	Simple Proportional
SPT	Satellite Position Table
SS	Self Similarity
TBTP	Terminal Burst Time Plan
ТСР	Transmission Control Protocol
TCT	Time-Slot Composition Table
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TIM	Terminal Information Message

TOS	Type-Of-Service
-----	-----------------

- TWTA Traveling Wave-Tube Amplifier
- UBR Unspecified Bit Rate
- UDP User Datagram Protocol
- ULPC UpLink Power Control
- VBDC Volume Based Dynamic Capacity
- VBR Variable Bit Rate
- VCM Variable Coding and Modulation
- VoIP Voice over IP
- VR Variable Rate

Κεφάλαιο 1

Μετάδοση Δεδομένων σε Δορυφορικά Δίκτυα Επικοινωνιών

1.1 Δουφφορικές Επικοινωνίες

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια έντονη τάση των σύγχρονων επικοινωνιών για παροχή υπηρεσιών πολυμέσων και Διαδικτύου (Internet Protocol, IP) στους χρήστες με εξασφάλιση εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service, QoS). Παραδοσιακά οι υπηρεσίες αυτές υποστηρίζονται από τα επίγεια δίκτυα που μπορούν να επιτύχουν τις αναγκαίες υψηλές ταχύτητες μετάδοσης. Παράλληλα, οι δορυφορικές επικοινωνίες έχουν προβάλει ως μια πολύ ελκυστική λύση για την παροχή αμφίδρομης ευρυζωνικής πρόσβασης (broadband access) σε μεμονωμένους χρήστες (για παράδειγμα, υπηρεσίες Direct-To-Home, DTH) καθώς και υπηρεσιών ευρυεκπομπής (broadcasting services) σε ομάδες σταθερών ή κινούμενων χρηστών σε περιπτώσεις όπου δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίγεια δίκτυα. Επιπλέον, τα δορυφορικά δίκτυα μπορούν να εξυπηρετήσουν χρήστες σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές όπου η πρόσβαση στο Διαδίκτυο και τις υπόλοιπες υπηρεσίες πολυμέσων ήταν για χρόνια ανέφικτη.

Οι σημαντικότεροι λόγοι που οδήγησαν στην ανάπτυξη των δορυφορικών επικοινωνιών είναι:

- Ευρεία κάλυψη: ένας και μόνο δορυφόρος μπορεί να καλύψει χρήστες σε έκταση ακόμη και μιας ηπείρου. Αυτό αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό, ιδιαίτερα για περιοχές μικρού πληθυσμού, δυσπρόσιτες ή απομακρυσμένες, όπου η επέκταση των ενσύρματων δικτύων δεν είναι εφικτή.
- Κάλυψη κινούμενων χρηστών: ένας κινητός χρήστης που βρίσκεται στην περιοχή κάλυψης

του δορυφόρου μπορεί να επικοινωνήσει με άλλους σταθερούς ή κινητούς χρήστες.

- Μειωμένο κόστος: στις δορυφορικές επικοινωνίες το κόστος, συμπεριλαμβανομένου του αρχικού κόστους εγκατάστασης, είναι ανεξάρτητο της απόστασης. Επιπλέον, οι δορυφορικές επικοινωνίες μπορούν να καλύψουν με λογικό κόστος ένα μεγάλο τμήμα της Γης και είναι σε θέση να εξυπηρετήσουν ένα μεγάλο αριθμό χρηστών.
- Ποικιλία συνδέσεων: οι δορυφορικές επικοινωνίες είναι σε θέση να παρέχουν με απλό και οικονομικό τρόπο ευρυζωνικές υπηρεσίες, χωρίς πολύπλοκα πρωτόκολλα δρομολόγησης.
- Ταχεία ανάπτυξη και αναδιοργάνωση του δικτύου: από τη στιγμή που θα τεθεί σε τροχιά ένας δορυφόρος μπορεί να εξυπηρετήσει ένα μεγάλο πλήθος χρηστών. Μέσω των δορυφορικών επικοινωνιών, οι υπηρεσίες πολυμέσων μπορούν εύκολα να παρασχεθούν σε μεγάλο πλήθος χρηστών σε διάφορες περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά ταχύτερα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα ενσύρματα δίκτυα.
- Ευελιξία στη διάθεση εύφους ζώνης: Είναι δυνατόν να παφέχεται εύφος ζώνης απλής ή διπλής κατεύθυνσης, στενής ή ευφείας ζώνης, συμμετφικό ή μη συμμετφικό. Επιπλέον, οι δοφυφόφοι επιτφέπουν ευφυζωνική πφόσβαση σε μεμονωμένους χφήστες, παφέχοντας λύση στο πφόβλημα τελικής πφόσβασης (last mile).

Οι δορυφόροι τοποθετούνται σε διάφορες τροχιές γύρω από τη Γη. Ανάλογα με το ύψος της τροχιάς τους κατατάσσονται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- Δοφυφόφοι Χαμηλής Τφοχιάς (Low Earth Orbit, LEO) που κινούνται σε τφοχιές που βφίσκονται σε υψόμετφο που κυμαίνεται μεταξύ 500 και 2.000 km. Η πεφίοδος πεφιφοφάς πεφί τη Γη είναι πεφίπου 100 λεπτά και ο χφόνος κατά τον οποίο ο δοφυφόφος είναι οφατός είναι 15 λεπτά. Οι τφοχιές δοφυφόφων LEO μποφεί να είναι πολικές ή υπό κλίση.
- Δοφυφόφοι Μέσης Τφοχιάς (Medium Earth Orbit, MEO) Οι τφοχιές τους μποφεί να είναι κυκλικές ή ελλειπτικές σε υψόμετφο που κυμαίνεται από 8.000 μέχφι 12.000 km. Η πεφίοδος πεφιφοφάς πεφί τη Γη είναι 5 έως 12 ώφες και ο χφόνος κατά τον οποίο ο δοφυφόφος είναι οφατός είναι 2-4 ώφες.
- Γεωστατικοί Δορυφόροι (Geosynchronous Earth Orbit, GEO) Είναι εγκατεστημένοι στο επίπεδο που ορίζεται από τον Ισημερινό της Γης σε ύψος 35,780 km με περίοδο περιφοράς

24 ώρες και ο χρόνος κατά τον οποίο ο δορυφόρος είναι ορατός είναι 24 ώρες. Το ύψος και η ισημερινή τροχιά των Γεωστατικών δορυφόρων έχουν προσδιορισθεί με τέτοιο τρόπο ώστε οι γεωστατικοί δορυφόροι να περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα όπως και η Γη. Συνεπώς, οι γεωστατικοί δορυφόροι φαίνονται ακίνητοι από ένα σταθερό σημείο επί της επιφάνειας της Γης, χαρακτηριστικό που είναι επιθυμητό για τις δορυφορικές επικοινωνίες.

Ένα δοευφοεικό σύστημα επικοινωνιών αποτελείται από ένα πλήθος δοευφόεων του ίδιου τύπου (GEO, MEO ή LEO) που καλύπτουν μια περιοχή ή και όλη τη Γη. Τρεις γεωστατικοί δοουφόροι επαρκούν για να καλύψουν όλη την επιφάνεια της γης εκτός από τις πολικές περιοχές. Οι γεωστατικοί δορυφόροι είναι κατάλληλοι για ευρεία κάλυψη, για υπηρεσίες ευρυεκπομπής και για υπηρεσίες κινητών και σταθερών επικοινωνιών. Οι δορυφόροι ΜΕΟ και LEO είναι μη στατικοί σε σχέση με ένα σημείο στην επιφάνεια της Γης. Συνεπώς, διαφορετικοί δορυφόροι τέτοιου τύπου εναλλακτικά παρέχουν κάλυψη για τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες σε δεδομένη περιοχή της Γης. Ένα πλήρες σύστημα ΜΕΟ απαιτεί τη χρήση 10-12 δορυφόρων για να εξασφαλισθεί ελάχιστη γωνία ανύψωσης 30°. Τα συστήματα LEO αποτελούνται από περισσότερους των 40 δορυφόρων για να εξασφαλισθεί ελάχιστη γωνία ανύψωσης από 10° έως 40° . Η ελάχιστη γωνία ανύψωσης που απαιτείται στην περίπτωση των δορυφόρων MEO και LEO εξασφαλίζει υψηλή διαθεσιμότητα διαύλου και αποδεκτές μεταβολές στην καθυστέρηση. Επιπλέον, τα δορυφορικά συστήματα LEO και ΜΕΟ χαρακτηρίζονται από μικρότερη καθυστέρηση διάδοσης και, συνεπώς, μικρότερη καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων σε σύγκριση με τους γεωστατικούς δορυφόρους. Οι γεωστατικοί δορυφόροι είναι πολύ μεγάλοι και απαιτούνται μεγάλες κεραίες για την εξασφάλιση αξιόπιστης ζεύξης με τους επίγειους σταθμούς. Οι δορυφόροι ΜΕΟ είναι μικρότεροι από τους γεωστατικούς δορυφόρους και, συνεπώς, οι διαδικασίες εκτόξευσης είναι λιγότερο δαπανηρές. Τέλος, οι δορυφόροι LEO είναι μικρότεροι και λιγότερο δαπανηροί στην κατασκευή και την εκτόξευση σε σχέση με τις προηγούμενες κατηγορίες.

Η πεφιοχή κάλυψης ενός δοφυφόφου διαιφείται σε επί μέφους πεφιοχές, καθεμιά από τις οποίες ακτινοβολείται από διαφοφετική κατευθυντική κεφαία του δοφυφόφου με στόχο την αύξηση της πυκνότητας ισχύος. Επιπλέον, η κάλυψη με πολλαπλές δέσμες παφουσιάζει και άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως την αποτελεσματική κατανομή των πόφων με επαναχφησιμοποίηση συχνοτήτων ή το χαμηλότεφο κόστος εξοπλισμού του επίγειου σταθμού αφού απαιτούνται μικφότεφες κεφαίες λόγω της κάλυψης της πεφιοχής με υψηλότεφη ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας.

22

Οι ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται από τις δορυφορικές επικοινωνίες είναι οι ζώνες [1]:

- L (1 2 GHz)
- S (2 4 GHz)
- C (4 8 GHz)
- X (8 12 GHz)
- Ku (12 18 GHz)
- K (18 26 GHz)
- Ka (26 40 GHz)
- V (40 75 GHz).

Οι ανωτέρω ζώνες συχνοτήτων χρησιμοποιούνται στις εμπορικές και στρατιωτικές δορυφορικές επικοινωνίες. Οι τυπικές εκχωρήσεις ζωνών συχνοτήτων για τις διαφορετικές υπηρεσίες των δορυφορικών επκοινωνιών είναι:

- Σταθεφές Δοφυφοφικές Υπηφεσίες (Fixed Satellite Service, FSS): 6/4 GHz (ζώνη C), 8/7 GHz (ζώνη X), 14/12-11 GHz (ζώνη Ku), 30/20 GHz (ζώνη Ka), 50/40 GHz (ζώνη V). Οι υπηφεσίες αυτές αφοφούν επικοινωνίες με σταθεφά επίγεια τεφματικά. Επιπλέον, οι σταθεφές δοφυφοφικές υπηφεσίες είναι συχνά υπηφεσίες ευφείας ζώνης (τυπικά 1-200 Mbit/s) λόγω του διαθέσιμου εύφους ζώνης φαδιοσυχνοτήτων και της κατάλληλης επίδοσης του διαύλου με τη χφήση επίγειων σταθεφών κατευθυντικών κεφαιών. Οι υπηφεσίες αυτές αφχικά ανατέθηκαν σε γεωστατικούς δοφυφόφους. Ωστόσο, είναι δυνατή και η ανάθεση των υπηφεσιών αυτών και σε μη γεωστατικούς δοφυφόφους.
- Δοφυφοφικές Υπηφεσίες Ευφυεκπομπής (Broadcasting Satellite Service, BSS): 2/2.2 GHz (ζώνη S), 12 GHz (ζώνη Ku), 2.6/2.5 GHz (ζώνη S). Οι υπηφεσίες αυτές αφοφούν άμεσες μεταδόσεις ευφυεκπομπής μέσω δημόσιων φοφέων. Οι υπηφεσίες αυτές αφχικά ανατέθηκαν σε γεωστατικούς δοφυφόφους. Ωστόσο, είναι δυνατή και η ανάθεση των υπηφεσιών αυτών και σε μη γεωστατικούς δοφυφόφους.

• Κινητές Δορυφορικές Υπηρεσίες (Mobile Satellite Service, MSS): 1.6/1.5 GHz (ζώνη L), 30/20 GHz (ζώνη Ka). Οι υπηρεσίες αυτές αφορούν επικοινωνία με κινητούς επίγειους χρήστες (πχ. πλοία, αυτοκίνητα, αεροπλάνα και ανθρώπους). Ένα παράδειγμα κινητών δορυφορικών υπηρεσιών είναι το σύστημα Inmarsat που λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων L με γεωστατικούς δορυφόρους για κινητές επίγειες υπηρεσίες. Οι ζώνες αυτές εκχωρήθηκαν αργότερα και σε μη γεωστατικά δορυφορικά συστήματα.

Όσον αφορά τις ζώνες συχνοτήτων αξίζει να σημειωθεί ότι η ανάγκη αξιοποίησης περισσότερου ραδιοφάσματος, η συμφόρηση στις χαμηλότερες ζώνες L, S και C και η διάθεση της ζώνης X για κρατικές χρήσεις (στρατιωτικές σταθερές υπηρεσίες) οδήγησαν στη σταδιακή μετάβαση της λειτουργίας των δορυφορικών δικτύων στη ζώνη Ku που, πλέον, χρησιμοποιείται από την πλειοψηφία των ψηφιακών δορυφορικών συστημάτων ευρυεκπομπής καθώς και από τα σύγχρονα συστήματα για πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Αν και η ζώνη Ka παρέχει τη δυνατότητα αξιοποίησης περισσότερου ραδιοφάσματος με μικρότερες κεραίες σε σύγκριση με τη ζώνη Ku παρουσιάζει το πρόβλημα της σημαντικής εξασθένησης του σήματος όταν επικρατούν κακές καιρικές συνθήκες (πχ βροχή).

Ένας αναμεταδότης είναι μια μονάδα λήψης - μετάδοσης στο δορυφόρο. Λαμβάνει ένα σήμα από τη Γη (άνω ζεύξη), το επεξεργάζεται και το αναμεταδίδει προς τη Γη σε διαφορετική συχνότητα (κάτω ζεύξη). Διακρίνονται δύο είδη αναμεταδότη:

- Αναμεταδότης τύπου Bent-pipe : Στην περίπτωση αυτή ο αναμεταδότης δρα ως απλός επαναλήπτης. Στο δορυφόρο το σήμα ενισχύεται και αναμεταδίδεται χωρίς να υπάρχει βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου ή της ποιότητας του σήματος.
- Αναγεννητικός αναμεταδότης (Regenerating transponder): Στην περίπτωση αυτή ο αναμεταδότης αναγεννά το σήμα πριν την αναμετάδοσή του στην κάτω ζεύξη. Οι δορυφόροι που διαθέτουν αναγεννητικούς αναμεταδότες μπορούν να πραγματοποιούν διαδορυφορικές ζεύξεις (Inter-Satellite Links, ISLs) με άλλους δορυφόρους, επιτρέποντας με τον τρόπο αυτό τη δρομολόγηση του σήματος στο διάστημα.

1.1.1 Βασικά προβλήματα στη σχεδίαση δορυφορικών συστημάτων επικοινωνιών

Οι δοξυφοξικές επικοινωνίες αποτελούν μια ελκυστική λύση για την παξοχή υπηξεσιών ευξυεκπομπής και πολυμέσων. Για να είναι σε θέση τα σύγχξονα δοξυφοξικά δίκτυα επικοινωνιών να υποστηξίξουν τις νέες υπηξεσίες και τις αντίστοιχες απαιτήσεις ποιότητας υπηξεσίας, πξέπει να αντιμετωπισθούν τα ακόλουθα σοβαξά ζητήματα που αναφέξονται στη συνέχεια:

Καθυστέρηση διάδοσης

Η καθυστέρηση διάδοσης (Round Trip propagation Delay, RTD) είναι ο χρόνος διάδοσης του πακέτου στο δίαυλο. Στις δορυφορικές επικοινωνίες, η τιμή του εξαρτάται από τη δορυφορική τροχιά, τη σχετική θέση του χρήστη επί της Γης και το είδος του δορυφόρου. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση αναγεννητικού δορυφόρου η καθυστέρηση διάδοσης περιλαμβάνει μια απλή μετάβαση από τη Γη στο δορυφόρο και πίσω στη Γη, ενώ στην περίπτωση αναμεταδότη τύπου bent-pipe περιλαμβάνει διπλή μετάβαση καθώς το κέντρο ελέγχου του δικτύου βρίσκεται στον επίγειο σταθμό. Στην περίπτωση γεωστατικών αναγεννητικών δορυφόρων η καθυστέρηση διάδοσης λαμβάνει τιμές στο εύρος 239-280 ms. Συγκεκριμένα, είναι ίση με 239.6 ms για ένα επίγειο τερματικό στον ισημερινό της Γης ακριβώς κάτω από το δορυφόρο, ενώ λαμβάνει την τιμή 280 ms για ένα επίγειο τερματικό στις παρυφές της περιοχής κάλυψης ενός γεωστατικού δορυφόρου που βλέπουν το δορυφόρο υπό τη μικρότερη δυνατή γωνία ανύψωσης. Η καθυστέρηση διάδοσης μπορεί ακόμα να αναφέρεται σε μια σύνδεση που περιλαμβάνει περισσότερες από μία ζεύξεις. Στην περίπτωση αυτή για γεωστατικούς δορυφόρους η καθυστέρηση διάδοσης λαμβάνει τιμές από 480 έως 558 ms. Η καθυστέρηση διάδοσης αυξάνεται με το ύψος της δορυφορικής τροχιάς και μειώνεται με τη γωνία ανύψωσης. Οι δορυφόροι χαμηλής και μέσης τροχιάς που κινούνται σε χαμηλότερο υψόμετρο έχουν μικρότερη καθυστέρηση διάδοσης από τους γεωστατικούς δορυφόρους. Υψηλές τιμές της καθυστέρησης διάδοσης προκαλούν προβλήματα στις διαδραστικές εφαρμογές και τις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Επιπλέον, αξιόπιστα πρωτόκολλα του στρώματος μεταφοράς αντιμετωπίζουν προβλήματα καθώς η καθυστέρηση μεταφοράς των πακέτων από άκρο σε άκρο οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην καθυστέρηση διάδοσης στο δορυφορικό τμήμα του δικτύου. Η μέγιστη τιμή της καθυστέρησης διάδοσης για δεδομένο δορυφόρο εξαρτάται από την ελάχιστη γωνία ανύψωσης, δηλαδή τη γωνία ανύψωσης στο άκρο της περιοχής κάλυψης.

Ατμοσφαιρικές επιδράσεις

Οι επιδράσεις της ατμόσφαιρας που προκαλούν εξασθένηση του σήματος στις δορυφορικές επικοινωνίες διακρίνονται:

- Απόσβεση λόγω απορρόφησης από ατμοσφαιρικά αέρια: Το οξυγόνο (ξηρός αέρας) και η υγρασία προσδιορίζουν μια απόσβεση του ηλεκτρομαγνητικού σήματος που εξαρτάται από τη συχνότητα μετάδοσης: κάτω από 10 GHz είναι δυνατόν να αγνοηθεί η επίδραση των ατμοσφαιρικών αερίων, μεταξύ 10 και 150 GHz, το μοριακό οξυγόνο είναι η κύρια αιτία απόσβεσης, ενώ για συχνότητες πάνω από 150 GHz, η υγρασία αποτελεί την κύρια αιτία απόσβεσης.
- Απόσβεση λόγω βροχής: Είναι το σημαντικότερο είδος απόσβεσης μεταξύ αυτών που οφείλονται σε ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Υπάρχουν διάφορα μοντέλα πρόβλεψης για την εκτίμησή της με κύριες παραμέτρους το ρυθμό βροχόπτωσης, το ενεργό μήκος της ραδιοζεύξης και το ύψος βροχόπτωσης.
- Απόσβεση από τα σύννεφα και την ομίχλη: Δεν είναι τόσο σημαντική για συστήματα που λειτουργούν κάτω από τα 30 GHz, ενώ είναι σημαντική σε συχνότητες πάνω από 30 GHz.
 Αυτό το είδος απόσβεσης εξαρτάται, επίσης, από τη θερμοκρασία και την πυκνότητα υγρασίας. Εμπειρικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της απόσβεσης από τα σύννεφα και την ομίχλη.
- Ταχείες μεταβολές: Είναι ένα φαινόμενο που επηξεάζει τα δοξυφοξικά συστήματα επικοινωνιών που λειτουξγούν υπό γωνίες ανύψωσης μεγαλύτεξες των 10° και σε συχνότητα πάνω από 10 GHz. Η επίδεαση αυτή συνίσταται σε μικξές και ταχείες μεταβολές του πλάτους, της φάσης, του επιπέδου πόλωσης και της γωνίας άφιξης του ηλεκτεριαγνητικού σήματος, λόγω μεταβολών του συντελεστή διάθλασης της ιονόσφαιζας.

26

Απώλειες

Στα δοφυφοφικά δίκτυα το ποσοστό λανθασμένων ψηφίων (Bit Error Ratio, BER) είναι πολύ υψηλό λόγω των δυσμενών ατμοσφαιφικών επιδφάσεων. Η ποιότητα του δοφυφοφικού διαύλου μποφεί να υποστεί ταχύτατη υποβάθμιση που πφοκαλεί μεγάλες ακολουθίες λανθασμένων ψηφίων. Με χφήση πφοσαφμοστικής κωδικοποίησης FEC (Forward Error Correction) για τη διόφθωση σφαλμάτων, είναι δυνατόν να μειωθεί σημαντικά το BER με κόστος το μικφότεφο φυθμό μετάδοσης πφαγματικής πληφοφοφίας αφού τμήμα του διαθέσιμου εύφους ζώνης χφησιμοποιείται για τη μετάδοση πλεοναζόντων ψηφίων.

1.1.2 Σχήματα Πολλαπλής Προσπέλασης

Πολλαπλή προσπέλαση είναι η μέθοδος μέσω της οποίας πολλοί επίγειοι σταθμοί μεταδίδουν ταυτόχρονα ροή κίνησης μέσω δορυφόρου. Τα σχήματα πολλαπλής προσπέλασης κατανέμουν το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε ένα πλήθος επίγειων σταθμών. Οι πλέον διαδεδομένες τεχνικές πολλαπλής προσπέλασης είναι:

- Πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiple Access, FDMA)
- Πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA)
- Πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης κώδικα (Code Division Multiple Access, CDMA)
- Συνδυαστικές τεχνικές των παραπάνω σχημάτων

Όταν ένας δοφυφόφος διαθέτει κεφαία πολλαπλών δεσμών, πολλοί χφήστες μποφούν ταυτόχφονα να έχουν πφόσβαση στο δοφυφόφο εφόσον καλύπτονται από διαφοφετικές δέσμες. Η τεχνική πολλαπλής πφοσπέλασης που χφησιμοποιείται στην πεφίπτωση αυτή είναι η πολλαπλή πφοσπέλαση διαίφεσης χώφου (Spatial Division Multiple Access, SDMA). Συγκεκφιμένα, μέσω της κεφαίας πολλαπλών δεσμών οφισμένες δέσμες μποφούν να χφησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες υπό την πφοϋπόθεση ότι η παφεμβολή που δημιουφγείται λόγω των πλευφικών λοβών είναι αμελητέα. Με την αναχφησιμοποίηση συχνοτήτων επιτφέπεται η καλύτεφη αξιοποίηση των πόφων του συστήματος.

Πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης συχνότητας, FDMA

Κατά την πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης συχνότητας το διαθέσιμο εύρος ζώνης διαιρείται σε ίσα τμήματα σε προκαθορισμένες ζώνες συχνοτήτων και σε κάθε επίγειο σταθμό εκχωρείται προκαθορισμένη περιοχή συχνότητας. Απαιτούνται ζώνες προστασίας (guard bands) για την αποφυγή των παρεμβολών. Το εύρος ζώνης που εκχωρείται σε ένα επίγειο σταθμό περιορίζεται από το εύρος ζώνης ανά φέρον και το σηματοθορυβικό λόγο. Η πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης συχνότητας απαιτεί την ταυτόχρονη μετάδοση ενός πλήθους φερόντων στο δορυφόρο μέσω ενός ενισχυτή (Traveling-Wave-Tube Amplifier, TWTA) που είναι μη γραμμικός, δηλαδή δημιουργεί προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης λόγω της παρουσίας πολλαπλών φερόντων. Τα προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης δημιουργούν παρεμβολές μεταξύ των σημάτων του FDMA σχήματος. Ο μόνος τρόπος για να επιτευχθεί μείωση των προϊόντων ενδοδιαμόρφωσης είναι η μείωση του περιθωρίου ισχύος εισόδου ενισχυτή ώστε να λειτουργεί στη γραμμική περιοχή.

Πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης χρόνου, TDMA

Κατά την πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης χρόνου, η (χρονική) χρήση του συνολικού εύρους ζώνης διαιρείται σε χρονοσχισμές, οι οποίες οργανώνονται σε μια περιοδική δομή που ονομάζεται πλαίσιο. Κάθε χρονοσχισμή χρησιμοποιείται για τη μεταφορά ενός πακέτου πληροφορίας. Στην άνω ζεύξη σε κάθε επίγειο σταθμό εκχωρείται ένας προκαθορισμένος αριθμός χρονοσχισμών για τη μετάδοση καταιγισμών κίνησης μέσω του κοινού δορυφορικού αναμεταδότη. Ομοίως, στην κάτω ζεύξη από το δορυφόρο στα τερματικά χρησιμοποιείται μόνο ένα φέρον. Συνεπώς, η πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης χρόνου παρέχει το πλεονέκτημα στον ενισχυτή TWTA να λειτουργεί κοντά στον κόρο μεγιστοποιώντας κατά αυτόν τον τρόπο το σηματοθορυβικό λόγο κάτω ζεύξης. Ωστόσο, η παρεμβολή και στην περίπτωση αυτή δεν εξαλείφεται πλήρως και εμφανίζεται με τη μορφή της διασυμβολικής παρεμβολής (inter-symbol interference). Η πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης χρόνου είναι κατάλληλη για την περίπτωση μεταβλητών αιτήσεων κίνησης και είναι εύρωστη στο θόρυβο και την παρεμβολή. Ωστόσο, επειδή κάθε πλαίσιο περιέχει ένα πλήθος ανεξάρτητων μεταδόσεων, κάθε σταθμός πρέπει να γνωρίζει ακριβώς πότε να εκπέμψει. Επίσης, ένα πλήθος επίγειων τερματικών, που το καθένα βρίσκεται σε διαφορετική απόσταση από το δόρυφόρο, πρέπει να μεταδίδουν ανεξάρτητους καταιγισμούς κατά τέτοιον τρόπο που οι καταιγισμοί πρέπει να φτάνουν στο δορυφόρο κατά αντιστοιχία με την αρχή των χροχοσχισμών που έχουν εκχωφηθεί. Αυτός ο στόχος επιτυγχάνεται με την οφγάνωση του εύφους ζώνης σε πλαίσια, τα οποία πεφιέχουν καταιγισμούς αναφοφάς που δημιουφγούν απόλυτο χφόνο στο δίκτυο. Οι καταιγισμοί αναφοφάς μεταδίδονται από το σταθμό ελέγχου στην πεφίπτωση κεντφικά ελεγχόμενου δοφυφοφικού δικτύου. Ο καταιγισμός ελέγχου πεφιέχει πληφοφοφίες συγχφονισμού και σηματοδοσίας και ταυτοποιεί το σταθμό που μεταδίδει. Ο καταιγισμός αναφοφάς αποτελεί την επιπφόσθετη πληφοφοφία του πλαισίου. Όσο μικφότεφη η επιπφόσθετη πληφοφοφία τόσο αυξάνεται η διέλευση και η αποτελεσματικότητα του συστήματος, αλλά τόσο μεγαλύτεφη και η δυσκολία διατήφησης συγχφονισμού.

Η πολλαπλή προσπέλαση στο δορυφορικό δίαυλο μπορεί να είναι κεντρικά ελεγχόμενη ή κατανεμημένη. Ο κεντρικός έλεγχος είναι γενικά πιο εύρωστος, ενώ ο κατανεμημένος ανταποκρίνεται καλύτερα στις μεταβολές της κίνησης, καθώς επιτρέπει ανανέωση των εκχωρήσεων σε χρόνο ίσο με την καθυστέρηση διάδοσης.

Πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης κώδικα, CDMA

Στην πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης κώδικα σε κάθε επίγειο σταθμό το προς μετάδοση σήμα με πληροφοριακό περιεχόμενο κωδικοποιείται κατά τέτοιο τρόπο ώστε η πληροφορία από τον αποστολέα να μπορεί να αποκωδικοποιηθεί μόνο από ένα κατάλληλα συγχρονισμένο παραλήπτη που γνωρίζει τον κώδικα (ψηφιακή ακολουθία) που χρησιμοποιείται κατά τη μετάδοση. Το πλεονέκτημα του CDMA έναντι των FDMA και TDMA είναι ότι η επικοινωνία μεταξύ των χρηστών γίνεται ταυτόχρονα στην ίδια περιοχή συχνοτήτων. Επιπλέον κάθε χρήστης καταλαμβάνει συνεχώς όλο το εύρος ζώνης του δορυφορικού αναμεταδότη και δεν απαιτείται ούτε διαχωρισμός συχνότητας ούτε χρονικός διαχωρισμός για την εκπομπή σημάτων άνω ζεύξης από τους επίγειους σταθμούς του συστήματος και μόνο οι σταθμοί που επικοινωνούν χρειάζεται να συντονίσουν τις μεταδόσεις τους. Η λογική του CDMA είναι η διαμόρφωση του μεταδιδόμενου σήματος από μια ψευδοτυχαία ακολουθία δυαδικών ψηφίων. Το διαμορφωμένο σήμα που προκύπτει καταλαμβάνει εύρος ζώνης μεγαλύτερο κατά PG φορές από το αρχικό σήμα, όπου PG (Processing Gain) το κέρδος επεξεργασίας. Το κέρδος επεξεργασίας είναι ο λόγος του εύρους ζώνης που καταλαμβάνει το διαμορφωμένο σήματος προς το εύρος ζώνης του αρχικού σήματος. Επομένως, όσο μεγαλύτερο το κέρδος επεξεργασίας τόσο μεγαλύτερο το εύρος ζώνης που απαιτείται από το σύστημα για τη μετάδοση του διαμορφωμένου σήματος. Για το λόγο αυτό και το σύστημα CDMA αναφέρεται και ως σύστημα πολλαπλής προσπέλασης απλωμένου φάσματος.

Η δημιουργία κατάλληλων ψευδοτυχαίων ακολουθιών είναι σημαντική για το διαχωρισμό των ταυτόχρονων διαφορετικών μεταδόσεων στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Ο παραλήπτης πρέπει να χρησιμοποιεί την ίδια ψευδοτυχαία ακολουθία με αυτήν του αποστολέα για την ορθή αποκωδικοποίηση του επιθυμητού σήματος. Υπάρχουν δύο τρόποι για την δημιουργία των μεταδιδόμενων σημάτων με τις ψευδοτυχαίες ακολουθίες:

- Απευθείας πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης κώδικα (Direct Sequence-CDMA), όπου το μεταδιδόμενο σήμα διαμορφώνει απευθείας την ψευδοτυχαία ακολουθία. Το σχήμα αυτό είναι κατάλληλο για διαμορφώσεις BPSK και QPSK.
- Πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης κώδικα με εναλλαγή συχνοτήτων (Frequency Hopping-CDMA), όπου η ψευδοτυχαία ακολουθία χρησιμοποιείται για να εναλλάσει τη συχνότητα των μεταδιδόμενων συμβόλων. Το σχήμα αυτό είναι κατάλληλο για διαμόρφωση FSK.

Μεικτά σχήματα

Το μειονέκτημα του TDMA είναι η ανάγκη να λαμβάνονται υπόψη οι αιτήσεις όλων των τερματικών για όλο το εύgoς ζώνης του συστήματος, ακόμα και όταν κάποιο τερματικό χρησιμοποιεί μόνο ένα μικρό τμήμα του συνολικού εύgoυς ζώνης. Μια ενδιαφέρουσα λύση παρέχει το υβριδικό σχήμα πολλαπλής προσπέλασης διαίρεσης χρόνου με πολλαπλές συχνότητες (Multi-Frequency TDMA, MF-TDMA), το οποίο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του FDMA και του TDMA. Στο MF-TDMA εκχωρούνται πολλαπλά φέροντα για την πρόσβαση στην άνω ζεύξη, ενώ για κάθε φέρον ο χρόνος διαιρείται σύμφωνα με τη μέθοδο TDMA. Με κατάλληλη οργάνωση του εύρους ζώνης. Η μετάδοση της κίνησης του ίδιου τερματικού γίνεται σε χρονοσχισμές που μπορεί να ανήκουν σε διαφορετικά φέροντα. Ωστόσο, όταν χρησιμοποιείται ένας μόνο ενισχυτής το ίδιο τερματικό δεν μπορεί να μεταδώσει σε χρονοσχισμές διαφορετικών φερόντων την ίδια χρονική στιγμή διότι δημιουργούνται προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης. Η τεχνική MF-TDMA επιτρέπει την αποτελεσματική υποστήριξη διαφόρων ειδών κίνησης και παρέχει ευελιξία στην κατανομή των πόρων με την κατάλληλη κατάτμηση και οργάνωση του εύρους ζώνης.

1.2 Υπηρεσίες Διαδικτύου

1.2.1 Προφίλ κίνησης

Τα προφίλ κίνησης για υπηρεσίες Διαδικτύου προσδιορίζονται από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Ρυθμός Μετάδοσης (Transmission Rate): Είναι το εύφος τιμών που μποφούν να λάβουν οι απαιτήσεις σε εύφος ζώνης. Σε μεφικές πεφιπτώσεις η συγκεκφιμένη παφάμετφος πφοδιαγφάφεται μέσω ενός εύφους τιμών που αντιπφοσωπεύει τις τιμές που μποφεί να λάβει ο μέγιστος φυθμός μετάδοσης πακέτου (Peak Cell Rate, PCR). Σε άλλες πεφιπτώσεις δίδεται πλήφης χαφακτηφισμός της παφαμέτφου με βάση το μέγιστο, τον ανεκτό και το μέσο φυθμό μετάδοσης πακέτου (Peak, Sustainable, Medium Cell Rate, PCR/SCR/MCR).
- Εκφηκτικότητα της κίνησης (Burstiness): Εκτιμάται με διάφοφους τφόπους. Μια αξιόπιστη μέθοδος βασίζεται στο λόγο μέγιστου φυθμού (PCR) πφος μέσο φυθμό μετάδοσης πακέτου (SCR). Όταν ο λόγος αυτός δεν είναι γνωστός, η εκφηκτικότητα της κίνησης αξιολογείται αποκλειστικά μέσω της πφώτης παφαμέτφου.
- Συμμετρία (Symmetry): Αντανακλά τη σχέση μεταξύ της ροής πληροφορίας από τον πάροχο της υπηρεσίας προς το χρήστη και αντιστρόφως (συμμετρική ή ασύμμετρη). Στα δορυφορικά δίκτυα αντιπροσωπεύει ειδικότερα τη σχέση μεταξύ των ρυθμών μετάδοσης στη ζεύξη διαβίβασης και στη ζεύξη επιστροφής.
- Τοπολογία δικτύου (Network topology): Οι πιθανές τοπολογίες δικτύου εξετάζονται στην επόμενη ενότητα.

1.2.2 Τοπολογίες Δικτύου

Τα δοουφορικά δίκτυα ταξινομούνται σε μία από τις ακόλουθες τέσσερις δυνατές τοπολογίες δικτύου:

- 1) Σημείου προς σημείο (Point-to-Point, PP),
- 2) Σημείου προς πολλαπλά σημεία (Point-to-Multipoint, PMP),
- 3) Πολλαπλών σημείων προς σημείο (Multipoint-to-Point, MPP),

4) Πολλαπλών σημείων - προς - πολλαπλά σημεία (Multipoint-to-Multipoint, MPMP).

Καθεμία από τις ανωτέρω αρχιτεκτονικές δικτύου συνδυάζεται με διαφορετικές τεχνολογίες ώστε να εξασφαλίζεται η δυνατότητα λειτουργίας κατά τον αποτελεσματικότερο τρόπο. Πολλά δορυφορικά δίκτυα χρησιμοποιούν κάποιο συνδυασμό των τεσσάρων δυνατών τοπολογιών για να χειρίζονται διάφορους τύπους εφαρμογών και απαιτήσεων κίνησης.

Τα δίκτυα PP πεφιλαμβάνουν τη δημιουφγία μιας απλής ζεύξης μεταξύ δύο σημείων, είτε μονόδφομης (simplex) είτε αμφίδφομης (duplex). Καταλληλότεφο παφάδειγμα αυτού του είδους δικτύων είναι το τηλεφωνικό δίκτυο. Ένα τέτοιο δίκτυο επιτφέπει σε επίγειους σταθμούς να επικοινωνούν ένας πφος ένα μεταξύ τους. Για να είναι αυτό εφικτό πφέπει κάθε επίγειος σταθμός στο δίκτυο να διαθέτει επαφκή επίδοση μετάδοσης και λήψης ώστε να είναι σε θέση να ανταλλάσει δεδομένα ακόμα και με τον λιγότεφο αποτελεσματικό επίγειο σταθμό στο δίκτυο. Ο φυθμός μετάδοσης για υπηφεσίες δεδομένων σε κυκλώματα PP κυμαίνεται από 64Kbps σε κυκλώματα πολλαπλών καναλιών ανά φέφον (Multiple Channel per Carrier, MCPC) που χαφακτηφίζονται από υψηλό φυθμό μετάδοσης δεδομένων.

Τα δίκτυα PMP πεφιλαμβάνουν ένα απλό δίαυλο άνω ζεύξης (uplink) μέσω του οποίου αποστέλλονται τα δεδομένα προς μεγάλο αριθμό παραληπτών. Σε ένα τέτοιο δίκτυο και προκειμένου να προετοιμασθούν για τη διαδικασία λήψης, οι παραλήπτες συντονίζονται στην κοινή συχνότητα εκπομπής των δεδομένων. Τυπικές τιμές του ρυθμού μετάδοσης κυμαίνονται από 15Mbps έως 45Mbps. Οι εφαρμογές των δικτύων PMP αφορούν υπηρεσίες ευρυεκπομπής (broadcasting), εκπομπής προς πολλαπλούς χρήστες (multicast) και εκπομπής προς μοναδικό χρήστη (unicast).

Τα δοουφοοικά δίκτυα MPP χρησιμοποιούνται για τη συλλογή πληροφορίας από μεγάλο αριθμό απομακρυσμένων σημείων σε ένα κεντρικό σταθμό. Η διαδικασία λήψης των δεδομένων από τα απομακρυσμένα τερματικά προϋποθέτει τον ακριβή χρονικό συγχρονισμό των τερματικών του δικτύου στην κατάλληλη συχνότητα λήψης των δεδομένων. Ο συγχρονισμός επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ορθογώνιων τεχνικών FDMA, TDMA και CDMA.

Τέλος, τα δίκτυα MPMP σχεδιάσθηκαν με σκοπό να λειτουργούν σε διάταξη πλέγματος (mesh) ώστε κάθε κόμβος του δικτύου να έχει τη δυνατότητα να επικοινωνεί με οποιοδήποτε άλλο σε ένα απλό βήμα (single hop), δηλαδή χωρίς τη μεσολάβηση άλλου τερματικού ή επαναλήπτη. Ο συγκεκριμένος τρόπος επικοινωνίας ελαχιστοποιεί την καθυστέρηση μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη [2].

1.2.3 Παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας

Ως ποιότητα υπηξεσίας QoS αναφέξεται η ικανότητα ενός στοιχείου του δικτύου (π.χ. κάποιας εφαξμογής, ενός δξομολογητή ή τεξματικού) να εγγυάται την ικανοποίηση συγκεκεμμένων απαιτήσεων ως προς την κίνηση και την υπηξεσία. Ανάλογα με το τηλεπικοινωνιακό στζώμα που εξετάζεται (φυσικό, ζεύξης δεδομένων, δικτύου, μεταφοξάς, συνόδου, εφαξμογής), το στοιχείο του δικτύου οφείλει να ικανοποιεί συγκεκεξιμένα κειτήξια QoS για τα διαφοξετικά είδη κίνησης. Τα χαξακτηξιστικά βάσει των οποίων πεοσδιοξίζεται η QoS στο φυσικό στζώμα είναι:

- Καθυστέφηση (Delay): Αντιστοιχεί στην καθυστέφηση που υφίσταται ένα πακέτο κατά τη μεταφοφά του από τον αποστολέα στον παφαλήπτη. Στα δοφυφοφικά δίκτυα η μεγαλύτεφη συνεισφοφά στη συνολική καθυστέφηση πφοέρχεται από την καθυστέφηση διάδοσης (πεφίπου 270ms one way για γεωστατικούς δοφυφόφους). Πφοκειμένου για εφαφμογές Διαδικτύου, ο σημαντικότεφος παφάγοντας καθυστέφησης είναι ο χφόνος απόκφισης (response time).
- Διακύμανση καθυστέφησης (Jitter): Πφόκειται για τη διακύμανση της καθυστέφησης μετάδοσης των πακέτων. Ενδεικτικά, η χφονική αστάθεια μποφεί να οδηγήσει σε παφαμόφφωση της φωνής, ιδιαίτεφα σε συστήματα με μονάδες πφοσωφινής αποθήκευσης (buffers) μικφής χωφητικότητας, με έλλειψη πφοσαφμοστικών δυνατοτήτων ή σε συστήματα όπου συμβαίνουν ξαφνικές αυξήσεις της καθυστέφησης.
- Απώλεια πακέτων (Packet loss): Απώλειες πακέτων δημιουργούνται, αφενός, λόγω καθυστέρησης μετάδοσης οπότε πακέτα απορρίπτονται από τη μονάδα προσωρινής αποθήκευσης και, αφετέρου, λόγω των δυσμενών συνθηκών που επικρατούν στο δίαυλο, οπότε πακέτα αλλοιώνονται λόγω ενός ή περισσότερων λανθασμένων ψηφίων. Η απώλεια πακέτων οδηγεί σε μείωση της δυνατότητας ανάκτησης των δεδομένων, ιδιαίτερα σε υπηρεσίες που είναι ευάλωτες στην καθυστέρηση (π.χ. μετάδοση φωνής ή video) και δεν μπορούν να ανεχθούν την καθυστερημένη επαναμετάδοση των χαμένων πακέτων.
- Ρυθμός Μετάδοσης: Εκφράζει το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να υποστηρίξει το δίκτυο μεταξύ δύο σημείων. Περιορίζεται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του διαύλου αλλά και από το πλήθος των άλλων ροών που μοιράζονται τον ίδιο δίαυλο.

Οι πρώτες τρεις παράμετροι είναι αποκλειστικά παράμετροι QoS του φυσικού στρώματος, ενώ n τελευταία συνδέεται στενά με τη χρησιμοποίηση των πόρων. Για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου πρέπει να λαμβάνεται πρόνοια ώστε όλοι οι προαναφερθέντες παράγοντες να εξισορροπούνται μεταξύ τους. Για παράδειγμα, μονάδες προσωρινής αποθήκευσης μεγαλύτερης χωρητικότητας μειώνουν τη χρονική αστάθεια αλλά προκαλούν πρόσθετη καθυστέρηση. Ομοίως, η ενσωμάτωση περισσότερων πακέτων του στρώματος ζεύξης δεδομένων σε ένα πακέτο IP του στρώματος δικτύου (δεδομενογράφημα) βελτιώνει τη χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης αλλά προκαλεί πρόσθετη καθυστέρηση [2].

1.2.4 Ποιότητα Υπηρεσίας σε δορυφορικές υπηρεσίες κίνησης διαδικτύου

Η ποιότητα υπηρεσίας εξασφαλίζει την εγγυημένη εξυπηρέτηση των εφαρμογών από τον πάροχο της υπηρεσίας προς το απομακρυσμένο τερματικό ικανοποιώντας τις προδιαγραφές καθυστέρησης και απώλειας πακέτων. Στο στρώμα IP, οι απαιτήσεις QoS καθορίζονται από τις συμφωνίες σε επίπεδο υπηρεσίας (Service Level Agreements, SLA). Εφόσον η εσωτερική κίνηση του δικτύου υπερβεί τη χωρητικότητά του, οι απαιτήσεις QoS εξασφαλίζονται περιορίζοντας το συνολικό μέγεθος της κίνησης που ανταγωνίζεται για τους ίδιους πόρους του συστήματος. Η εγγύηση της QoS αφορά είτε το σύνολο της κίνησης είτε χωριστά την κάθε ροή πληροφορίας.

Τα διαφορετικά είδη εφαρμογών ποικίλλουν ως προς τις προδιαγραφές της QoS. Οι περισσότερες εφαρμογές είναι ευαίσθητες στην απώλεια πακέτων, η οποία αντιμετωπίζεται με αναμεταδόσεις των χαμένων πακέτων, δεδομένου ότι απώλειες πακέτων της τάξης του 5% οδηγούν, γενικά, σε πολύ χαμηλή ψηφιακή διέλευση (throughput). Οι εφαρμογές δεδομένων, όπως η μεταφορά αρχείων, δεν παρουσιάζουν ευαισθησία ως προς την καθυστέρηση. Οι εφαρμογές audio και video απαιτούν σταθερή εκχώρηση εύρους ζώνης.

Επίσης, τα συστήματα δοουφοοικών επικοινωνιών εξασφαλίζουν τις κατάλληλες προϋποθέσεις για την παροχή ευουζωνικών υπηρεσιών Διαδικτύου. Τα πρωτόκολλα του στρώματος μεταφοράς του Διαδικτύου, συγκεκομμένα το πρωτόκολλο ελέγχου της μετάδοσης (Transmission Control Protocol, TCP) και το πρωτόκολλο δεδομενογραφημάτων χρήστη (User Datagram Protocol, UDP), αποτελούν τη βάση της λειτουργίας του Διαδικτύου. Ωστόσο, η επίδοση αυτών των πρωτοκόλλων σε δορυφορικές ζεύξεις περιορίζεται από τη μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης και τις υψηλές απώλειες πακέτων όταν επικρατούν δυσμενείς συνθήκες διάδοσης στη ζεύξη. Η μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης επιμηκύνει τη διάρκεια της αρχικής φάσης του μηχανισμού TCP (Slow Start Phase) με αποτέλεσμα να μη γίνεται χρήση ολόκληρου του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Επιπλέον, το πρωτόκολλο TCP έχει σχεδιασθεί για λειτουργία σε δίκτυα χαμηλού ποσοστού λαθών θεωρώντας ότι οι απώλειες πακέτων οφείλονται αποκλειστικά σε συμφόρηση του δικτύου. Έτσι, όταν εμφανίζονται απώλειες πακέτων στο δορυφορικό δίαυλο, ο αποστολέας μειώνει το ρυθμό μετάδοσής του προκαλώντας μια άσκοπη μείωση της ψηφιακής διέλευσης.

Οι προτεινόμενοι μηχανισμοί ελέγχου των απαιτήσεων QoS για το ζεύγος πρωτοκόλλων ΙΡ/ΤCΡ του Διαδικτύου περιλαμβάνουν[2], [3]:

- 1) Την αρχιτεκτονική ολοκληρωμένων υπηρεσιών (Integrated Services, IntServ),
- 2) Την αρχιτεκτονική διαφοροποιημένων υπηρεσιών (Differentiated Services, DiffServ) και
- Το μηχανισμό μεταγωγής ετικέτας πολλαπλών πρωτοκόλλων (Multi-Protocol Label Switching, MPLS).

Η Αρχιτεκτονική Ολοκληρωμένων Υπηρεσιών (IntServ)

Η αρχιτεκτονική IntServ εγγυάται τις απαιτήσεις QoS στην κίνηση κάθε φοής πληφοφορίας βασιζόμενη στη δυναμική δέσμευση των πόρων. Για να εγγυώνται την απαραίτητη QoS ανά goń πληφοφορίας κάθε είδους κίνησης, οι δρομολογητές προχωρούν πρώτα στη δέσμευση των αναγκαίων πόρων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του πρωτοκόλλου δέσμευσης πόρων (Resource Reservation Protocol, RSVP) που αποτελεί πρωτόκολλο σηματοδοσίας για το σκοπό αυτό.

Η αρχιτεκτονική IntServ προσθέτει δύο κατηγορίες υπηρεσιών στο υφιστάμενο μοντέλο βέλτιστης προσπάθειας (best effort): την εγγυημένη υπηρεσία (guaranteed service) και την υπηρεσία ελεγχόμενου φορτίου (controlled load service). Η εγγυημένη υπηρεσία θέτει ένα άνω όριο στην καθυστέρηση αναμονής στην ουρά και υποστηρίζει εφαρμογές με απαιτήσεις πραγματικού χρόνου. Η υπηρεσία ελεγχόμενου φορτίου προσφέρει QoS ίδιου επιπέδου με την υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας υπό συνθήκες χαμηλού φόρτου του δικτύου με πρακτικά μηδενικές απώλειες και καθυστέρηση, ενώ, υπό συνθήκες υπερφόρτωσης του δικτύου, αποσκοπεί στην ελεγχόμενη κατανομή του συνολικού εύρους ζώνης σε πολλαπλές ροές κίνησης.

Συνοψίζοντας, η αρχιτεκτονική IntServ παρέχει εγγυήσεις QoS υψηλής ποιότητας μέσω δέσμευσης των πόρων για κάθε ροή πληροφορίας και θεωρείται καταλληλότερη για ειδικές εφαρ-
μογές, όπως ροές πληροφορίας που απαιτούν υψηλό εύρος ζώνης.

Η Αρχιτεκτονική Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών (DiffServ)

Η αρχιτεκτονική DiffServ έχει ως στόχο να επιλύσει το πρόβλημα της κλιμάκωσης (scalability) του δικτύου. Εγγυάται τις απαιτήσεις QoS για το σύνολο της κίνησης χρησιμοποιώντας ετικέτες στα πακέτα. Οι ετικέτες στα πακέτα ενεργοποιούνται μέσω συγκεκριμένων ψηφίων στην επικεφαλίδα τους ώστε κάθε πακέτο να αντιμετωπισθεί κατάλληλα ανάλογα με την κατηγορία υπηρεσίας στην οποία ανήκει. Η ενέργεια αυτή ορίζεται στο byte της επικεφαλίδας όπου καταγράφεται το είδος υπηρεσίας (Type-Of-Service, TOS). Συγκεκριμένα, έξι ψηφία του byte TOS ορίζουν το σημείο κώδικα των διαφοροποιημένων υπηρεσιών (DiffServ Code Point, DSCP).

Η αρχιτεκτονική DiffServ χρησιμοποιεί τον κώδικα διαφοροποίησης των υπηρεσιών DSCP ώστε σε κάθε μετάβασή του να επιλέγεται ο κατάλληλος τρόπος αντιμετώπισης του πακέτου από το δίκτυο (Per-Hop Behavior, PHB). Οι εναλλακτικοί τρόποι αντιμετώπισης από το δίκτυο αφορούν κυρίως τη διαδικασία προώθησης πακέτων, όπως, για παράδειγμα, τη σχετική προτεραιότητα κατά την απόρριψη ή την αποδοχή ενός αιτήματος εύρους ζώνης. Πριν ενεργοποιηθεί το πεδίο των διαφοροποιημένων υπηρεσιών σε ένα πακέτο, σημειώνεται στο σημείο DSCP ο τελευταίος κόμβος ή ο πρώτος δρομολογητής, ανάλογα με την QoS που απαιτεί το πακέτο. Στο πεδίο διαφοροποιημένων υπηρεσιών κάθε δρομολογητής ελέγχει απλώς το DSCP και αποφασίζει το πώς θα χειρισθεί το πακέτο χωρίς να απαιτείται πολύπλοκη κατηγοριοποίηση ή έλεγχος της κατάστασης ανά ροή. Εκτός από τις υπηρεσίες βέλτιστης προσπάθειας της αρχικής εκδοχής του πρωτοκόλλου του Διαδικτύου, η αρχιτεκτονική DiffServ ορίζει πέντε πρόσθετες κατηγορίες αντιμετώπισης της κάθε μετάβασης από το δίκτυο: Η μία ονομάζεται Επίσπευση της Προώθησης (Expedited Forwarding, EF) και οι υπόλοιπες τέσσερις Εγγυημένη Προώθηση (Assured Forwarding, AF).

Η αρχιτεκτονική διαφοροποιημένων υπηρεσιών είναι η αρχιτεκτονική που επιλέγεται από τα περισσότερα δορυφορικά συστήματα. Για παράδειγμα, τα πακέτα που παράγονται κατά τη μετάδοση φωνής τοποθετούνται σε μια κατηγορία αντιμετώπισης από το δίκτυο που παρέχει εγγυήσεις ρυθμού μετάδοσης (π.χ. ΕΓ), ώστε να τους αποδίδεται προτεραιότητα έναντι των υπηρεσιών δεδομένων που ανήκουν σε κατηγορία υπηρεσιών χαμηλότερης προτεραιότητας (π.χ. ΑΓ). Οι διαφοροποιημένες υπηρεσίες προσφέρουν σχετικά μικρή εγγύηση QoS αλλά, εφόσον η

36

αντιστοίχηση ανά κατηγορία προτεραιότητας ελέγχεται ορθά, η μέση επίδοση όλων τις ροών της κατηγορίας είναι εγγυημένη.

Η προώθηση των πακέτων στο στρώμα IP εξαρτάται από τις υπηρεσίες που προσφέρονται από το στρώμα MAC (Medium Access Control). Στην περίπτωση δορυφορικών συστημάτων εκχώρησης ανάλογα με τη ζήτηση (Bandwidth on Demand, BoD), οι τεχνικές του στρώματος MAC έχουν σημαντικό ρόλο στον έλεγχο των πόρων της άνω ζεύξης. Στην κάτω ζεύξη (downlink), οι λειτουργίες του πρωτοκόλλου MAC είναι πολύ απλούστερες σε σχέση με την αντίθετη κατεύθυνση μετάδοσης και αφορούν κυρίως την εγκατάσταση εικονικών ζεύξεων (virtual links) με κατάλληλο εύρος ζώνης. Προκειμένου να προσφέρουν εγγυήσεις QoS από άκρου-σε-άκρο (end-to-end QoS), στους κόμβους DiffServ πρέπει κατά τη διάρκεια της μετάδοσης να ανατίθεται κατάλληλο εύρος ζώνης χρησιμοποιώντας τη διαθέσιμη σηματοδοσία του στρώματος συνόδου (session layer) ή του στρώματος ελέγχου των συνδέσεων (connection control layer). Έτσι,

- η σηματοδοσία στο στρώμα συνόδου χρησιμοποιείται για τη δημιουργία συνόδων εφαρμογών μεταξύ χρηστών με προκαθορισμένες ή διαπραγματεύσιμες παραμέτρους.
- η σηματοδοσία στο στρώμα ελέγχου των συνδέσεων χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του δικτύου μεταφοράς με βάση τις παραμέτρους της συνόδου κάθε υπηρεσίας.

Ο Μηχανισμός Μεταγωγής Ετικέτας Πολλαπλών Πρωτοκόλλων (MPLS)

Ο μηχανισμός Μεταγωγής Ετικέτας Πολλαπλών Πρωτοκόλλων (Multiprotocol Label Switching, MPLS) επιχειρεί να εγκαταστήσει διαδρομές μετάδοσης στο δίκτυο κατά μήκος των οποίων τα πακέτα φέρουν κατάλληλες ετικέτες με σκοπό την αποτελεσματική τους προώθηση. Αυτό επιτρέπει την ταχύτερη προώθηση των πακέτων αλλά και την ευέλικτη δημιουργία εναλλακτικών διαδρομών μετάδοσης. Οι δρομολογητές εισόδου κατηγοριοποιούν τα εισερχόμενα πακέτα τοποθετώντας τους κατάλληλη επικεφαλίδα που περιέχει την αντίστοιχη ετικέτα για την αποτελεσματική προώθησή τους από τους εσωτερικούς δρομολογητές του δικτύου.

Στο μοντέλο MPLS, οι ετικέτες διανέμονται κατά δυναμικό τρόπο από το πρωτόκολλο διανομής ετικετών (Label Distribution Protocol, LDP) που δημιουργεί διαδρομές μεταγωγής ετικέτας (Label Switched Path, LSP) που κατά μήκος περιλαμβάνουν τους αντίστοιχους δρομολογητές μεταγωγής ετικέτας (Label Switched Routers, LSR) για την επεξεργασία και κατάλληλη προώθηση των ετικετών. Ουσιαστικά, το πρωτόκολλο LDP παράγει τις ετικέτες που χρησιμοποιούνται από

Ανοχή στα λάθη	Συνομιλία video και φωνής	Μηνύματα video και φωνής	Ροή video και ήχου	Fax
Έλλειψη ανοχής στα λάθη	Telnet, Διαδραστικά παιχνίδια	Συναλλαγές (e-commerce, browsing, email)	Μηνύματα κειμένου, downloads (ττχ. FTP)	Άφιξη email
	διαδραστικές	με απόκριση (καθυστέοηση ~ 2sec)	με χρονικό περιορισμό (καθυστέρηση ~ 10 sec)	μη κρίσιμες (καθυστέρηση >> 10 sec)

Πίνακας 1.1: Κατηγορίες ποιότητας υπηρεσίας IP σύμφωνα με τη Σύσταση ITU-T Y.1541. το δίκτυο κατά παρόμοιο τρόπο με τους πίνακες προώθησης που δημιουργούνται από τα τυπικά πρωτόκολλα δρομολόγησης. Πάντως, οι ετικέτες δεν αντιστοιχίζονται σε συγκεκριμένα πακέτα ούτε σε συγκεκριμένες ροές αλλά στη συνολική κίνηση.

1.2.5 Κατηγορίες κίνησης πολυμέσων ανάλογα με την ποιότητα υπηρεσίας

Ο Τομέας Προτυποποίησης Τηλεπικοινωνιών της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union - Telecom Standardization, ITU-T) δημιούργησε τη Σύσταση Υ.1541 για τον προσδιορισμό των στόχων της από άκρου-σε-άκρο επίδοσης του πρωτοκόλλου ΙΡ κατηγοριοποιώντας τις εφαρμογές σε οκτώ κατηγορίες QoS ανάλογα με την ανοχή στα λάθη και την καθυστέρηση. Οι κατηγορίες QoS αναφέρονται κυρίως σε υπηρεσίες δεδομένων και εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Ο Πιν.1.1 παρουσιάζει τις κατηγορίες ποιότητας υπηρεσίας ΙΡ.

1.2.6 Παράμετροι επίδοσης δικτύου ΙΡ

Η ITU-Τ ορίζει επίσης τέσσερις παραμέτρους επίδοσης του πρωτοκόλλου IP που αποτελούν βάση διαπραγμάτευσης και συμφωνίας μεταξύ χρηστών και παρόχων υπηρεσιών. Οι τέσσερις παράμετροι επίδοσης του δικτύου είναι:

- η καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων IP (IP Packet Transfer Delay, IPTD)
- η μεταβολή της καθυστέρησης πακέτων IP (IP Packet Delay Variation, IPDV)
- το ποσοστό απωλειών πακέτων IP (IP Packet Loss Ratio, IPLR)
- το ποσοστό λανθασμένων πακέτων IP (IP Packet Error Ratio, IPER) όπου, ανάλογα με την εφαθμογή, τα πακέτα με λάθη αποθρίπτονται ή όχι. Στην πρώτη περίπτωση (π.χ. στο πρωτόκολλο TCP), τα μεγέθη IPER και IPLR ταυτίζονται.

Κεφάλαιο 2

Πρότυπα Δορυφορικών Δικτύων

2.1 Εισαγωγή

Το Πρόγραμμα Εκπομπής Ψηφιακού Βίντεο (Digital Video Broadcasting, DVB Project), που ιδρύθηκε το Σεπτέμβριο του 2003, είναι μια κοινοπραξία άνω των 200 οργανισμών του δημόσιου και ιδιωτικού τομέα της βιομηχανίας της τηλεόρασης από περισσότερες από 25 χώρες από όλο τον κόσμο. Ακολουθώντας τις τάσεις και τις ανάγκες της αγοράς, η κοινοπραξία αυτή έχει ως στόχο τη σχεδίαση διεθνών προτύπων για την παροχή υπηρεσιών ψηφιακής τηλεόρασης βασισμένων στο πρότυπο MPEG-2 (Motion Picture Expert Group), οι οποίες ανταποκρίνονται στις πραγματικές ανάγκες και τις οικονομικές συνθήκες των καταναλωτών και της βιομηχανίας εκπομπής.

Η ανάγκη για συμβατότητα μεταξύ των εμπορικών παρόχων υπηρεσιών καθώς και παροχής αμφίδρομων ευρυζωνικών υπηρεσιών μέσω δορυφόρου οδήγησε το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) στη δημιουργία της οικογένειας προτύπων DVB-S (Digital Video Broadcasting via Satellite). Αντίστοιχα με την κατεύθυνση μετάδοσης την οποία προδιαγράφουν, τα πρότυπα της σειράς διακρίνονται σε:

 Πρότυπα DVB-S και DVB-S2 για τη ζεύξη διαβίβασης (forward link) μεταξύ Κεντρικού Επίγειου Σταθμού (Gateway Station, GW) και τερματικών RCST (Return Channel Satellite Terminals). Πρότυπο DVB-RCS (DVB-Return Channel Satellite) για τη ζεύξη επιστροφής (return link) μεταξύ των RCST και του GW.

Κατά τη ζεύξη διαβίβασης τα δεδομένα πολυπλέκονται στο πεδίο του χρόνου και μεταδίδονται μέσω ενός μόνο φέροντος. Αντίθετα, κατά τη ζεύξη επιστροφής πραγματοποιείται κατανομή των διαθέσιμων πόρων του συστήματος μεταξύ των απομακρυσμένων τερματικών ταυτόχρονα στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας.

Το πρότυπο DVB-RCS προσφέρει σημαντική ευελιξία όσον αφορά την κατανομή των πόρων του δορυφορικού συστήματος, η οποία οδηγεί στη βέλτιστη και αποδοτική εκμετάλλευση του συστήματος για την υποστήριξη των διαρκώς αναπτυσσομένων υπηρεσιών Διαδικτύου IP. Αντίθετα προς τις καθιερωμένες δορυφορικές εφαρμογές (π.χ. εφαρμογές φωνής) που εξυπηρετούνται μέσω σταθερής κατανομής των πόρων, οι υπηρεσίες IP συνδυάζονται ιδανικά με δυναμικές τεχνικές κατανομής των πόρων BoD. Προς την κατεύθυνση αυτή, το πρότυπο DVB-RCS συνιστά μια αποδοτική πλατφόρμα για την υποστήριξη μεγάλου αριθμού ευρυζωνικών εφαρμογών μέσω δορυφόρου, εξασφαλίζοντας στα τερματικά τις κατάλληλες εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας QoS στο πλαίσιο ενός συστήματος με μεταβλητές απαιτήσεις εύρους ζώνης.

Από τη σκοπιά των παφόχων υπηφεσιών Διαδικτύου (Internet Service Providers, ISP), οι υπηφεσίες IP πφοσφέφουν ομαλή σύγκλιση μεταξύ των δικτύων μεταγωγής πακέτου και των παφαδοσιακών δικτύων μεταγωγής κυκλώματος. Η διασύνδεση μεγάλου αφιθμού δικτύων στο ίδιο διαδίκτυο καθώς και η ενσωμάτωση υπηφεσιών δεδομένων, φωνής και video συνεπάγονται ένα απλούστεφο σύστημα οφγάνωσης των υπηφεσιών, παφέχοντας έτσι οικονομικά κίνητφα στους παφόχους.

Μετά την περιγραφή της αρχιτεκτονικής του δορυφορικού δικτύου στο πλαίσιο του DVB, τα βασικά χαρακτηριστικά των προτύπων παρουσιάζονται στις ενότητες που ακολουθούν.

2.2 Αρχιτεκτονική Δικτύου

Η αρχιτεκτονική ενός δορυφορικού δικτύου που βασίζεται στο πρότυπο DVB-RCS περιλαμβάνει τις ακόλουθες οντότητες (entities) -βλ. Σχ. 2.1:

• Το γεωστατικό δορυφόρο



Σχήμα 2.1: Αρχιτεκτονική δικτύου DVB.

- Ένα αριθμό τερματικών RCST, τα οποία λειτουργούν ως πύλες διασύνδεσης του συστήματος προς τους εξωτερικούς χρήστες
- Το κέντρο ελέγχου του δικτύου (Network Control Center, NCC), το οποίο πραγματοποιεί λειτουργίες ελέγχου και παρακολούθησης του δικτύου και παράγει τα σήματα ελέγχου και συγχρονισμού για το συντονισμό ολόκληρου του δορυφορικού συστήματος
- Τις πύλες κίνησης (traffic gateways), οι οποίες λαμβάνουν τα σήματα από τα τερματικά RCST και παρέχουν υπηρεσίες αλληλεπίδρασης προς το δίκτυο ή υπηρεσίες σύνδεσης με το ευρύ κοινό, με ανεξάρτητους παρόχους υπηρεσιών ή με άλλα δίκτυα.
- Τις διατάξεις τροφοδότησης σήματος (Feeders), οι οποίες μεταδίδουν το σήμα της ζεύξης διαβίβασης στο δορυφόρο, στο οποίο είναι πολυπλεγμένα τα δεδομένα των χρηστών και τα σήματα ελέγχου και συγχρονισμού που απαιτούνται για τη λειτουργία του Διαδραστικού Δορυφορικού Δικτύου.



Σχήμα 2.2: Λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα του συστήματος DVB-S.

2.3 Το πρότυπο DVB-S

Το πρότυπο DVB-S [4], [5] αναπτύχθηκε στα πλαίσια του DVB και τυποποιήθηκε από το ETSI. Σχεδιάσθηκε ώστε να παρέχει υπηρεσίες τηλεοπτικών προγραμμάτων DTH για τις υπηρεσίες BSS και FSS και είναι κατάλληλο για εύρη αναμεταδότη που κυμαίνονται από 26 έως 72 MHz. Απευθύνεται σε ενσωματωμένους αποκωδικοποιητές στους δέκτες (Integrated Receiver Decoders, IRDs) καθώς και σε συλλεκτικά συστήματα κεραιών (Satellite Master Antenna Television, SMATV) και σε σταθμούς καλωδιακής τηλεόρασης.

Η ευελιξία του προτύπου DVB-S όσον αφορά την παροχή διαφορετικών τύπων υπηρεσιών οφείλεται στην υιοθέτηση της πολύπλεξης που παρέχει το πρότυπο MPEG-2 παρέχοντας τη δυνατότητα πολύπλεξης των ρευμάτων πληροφορίας εισόδου (input data stream), που αποτελούνται από ρεύματα video, ήχου και δεδομένων, σε ένα κοινό ρεύμα μεταφοράς. Τα πακέτα μεταφοράς έχουν σταθερό μέγεθος ίσο με 188 bytes, στο οποίο περιλαμβάνεται 1 byte συγχρονισμού, 3 bytes επικεφαλίδας που περιέχουν τα Αναγνωριστικά Πακέτου (Packet Identifiers, PID) και 184 bytes πληροφορίας. Στις επικεφαλίδες των πακέτων δεν συμπεριλαμβάνεται κάποιο πεδίο για προστασία από σφάλματα, λειτουργία που επαφίεται στο στρώμα προσαρμογής καναλιού (channel adaptation layer). Η πολύπλεξη είναι πολύ ευέλικτη και διαθέτει ένα κανάλι πληροφορίας υπηρεσιών για να επιτρέπει στο χρήστη να επιλέγει το πρόγραμμα που επιθυμεί.

Το λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα του συστήματος μετάδοσης του DVB-S απεικονίζεται στο Σχ.2.2, όπου φαίνονται τα χαρακτηριστικά του προτύπου. Τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης προσαρμόζουν τα σήματα τηλεόρασης που προκύπτουν στην έξοδο του πολυπλέκτη μεταφοράς του προτύπου MPEG-2 στο δορυφορικό δίαυλο. Το σχήμα διαμόρφωσης QPSK και η χρήση εξωτερικής κωδικοποίησης Reed-Solomon (RS) και εσωτερικής συνελικτικής κωδικοποίησης σης έχουν επιλεγεί από το σύστημα DVB-S για την αντιμετώπιση των περιορισμών ισχύος και των ισχυρών μη γραμμικών παραμορφώσεων που αναμένονται σε εφαρμογές DTH.

Το μεταδιδόμενο πλαίσιο (Σχ.2.3(a)) είναι συμβατό με τον πολυπλέκτη του προτύπου MPEG-2. Στα πλαίσια της συμμόρφωσης με τους κανονισμούς ραδιοσυχνοτήτων για την κατάληψη του ραδιοφάσματος και για την επίτευξη συγχρονισμού, στην έξοδο του MPEG-2 πολυπλέκτη πραγματοποιείται τυχαιοποίηση των ψηφίων οδηγώντας σε διασπορά της ενέργειας του σήματος. Η ψευδοτυχαία δυαδική ακολουθία (Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS) συγχρονίζεται σε ένα πλαίσιο οκτώ MPEG-2 πακέτων (Σχ.2.3(b)) που περιορίζεται από δύο ανεστραμμένα MPEG-2 sync bytes (SYNC 1). Τα πακέτα κωδικοποιούνται με χρήση του κώδικα Reed-Solomon, RS(204, 188) που είναι μια ελαττωμένη εκδοχή του πρωτότυπου κώδικα RS(255, 239) μέσω κατάλληλης προσθήκης 16 πλεοναζόντων bytes (Σχ.2.3(c)). Η προκύπτουσα κωδικοποιημένη κατά RS(204, 188) λέξη έχει διοθθωτική ικανότητα ίση με t = 8 bytes. Στο αλυσιδωτό σχήμα κωδικοποίησης που υιοθετείται από το σύστημα, τα λάθη στην έξοδο του αποκωδικοποιητή Viterbi δεν είναι στατιστικά ανεξάρτητα αλλά οργανωμένα σε καταιγισμούς λαθών που μπορεί να υπερφορτώσουν τον κώδικα RS. Για τη βελτίωση της διορθωτικής ικανότητας του κώδικα RS, η κωδικοποίηση RS ακολουθείται από συνελικτική παρεμβολή βάθους Ι = 12 (Σχ.2.3(d)). Την εξωτερική κωδικοποίηση RS διαδέχεται η εσωτερική συνελικτική κωδικοποίηση, η οποία είναι σε θέση να παρέχει διαφορετικά επίπεδα προστασίας από λάθη καθώς υποστηρίζει κατά περίπτωση τους ρυθμούς κώδικα 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 και 7/8. Η επιλογή του ουθμού κώδικα πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Τέλος, τα ψηφία διαμορφώνονται με χρήση διαμορφώσεων QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) και παράγοντα εξάπλωσης (roll-off factor) 0.35.

Το πρότυπο DVB-S ακολουθεί την πολύπλεξη διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiplexing, TDM) που υιοθετεί το MPEG-2, γεγονός που επιτρέπει τη μετάδοση πολλαπλών καναλιών ανά φέρον MCPC. Η προσπέλαση στο δορυφόρο πραγματοποιείται συνήθως με πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης χρόνου TDMA, εκτός από την περίπτωση εφαρμογών DVB-DSNG (Digital Satellite News Gathering), όπου η χρήση ενός καναλιού ανά φέρον (Single Channel per Carrier, SCPC) οδηγεί στην υλοποίηση τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης συχνότητας FDMA.

44



Σχήμα 2.3: Πολύπλεξη και δομή πλαισίου μετάδοσης.

2.4 Το πρότυπο DVB-S2

Το πρότυπο DVB-S2 [6], [7] αποτελεί ένα πρότυπο δεύτερης γενιάς για τη ζεύξη διαβίβασης σε δορυφορικά δίκτυα που προτυποποιήθηκε το 2003 και σταδιακά αντικαθιστά το DVB-S. Το νέο πρότυπο βασίζεται στις αρχές του DVB-S, παρέχει σημαντικές καινοτομίες και αποσκοπεί στην παροχή μιας ενιαίας πλατφόρμας για την εξυπηρέτηση υπηρεσιών Διαδικτύου IP. Το πρότυπο αυτό σχεδιάσθηκε με τρεις στόχους: βέλτιστη επίδοση μετάδοσης, συνολική ευελιξία και μικρή πολυπλοκότητα του δέκτη. Η κυριότερη καινοτομία του νέου προτύπου σχετίζεται με την εισαγωγή της τεχνικής προσαρμοστικής κωδικοποίησης και διαμόρφωσης (Adaptive Coding and Modulation, ACM), δηλαδή της δυνατότητας δυναμικής αλλαγής του ρυθμού κώδικα και του είδους διαμόρφωσης ανά πλαίσιο (frame) προσαρμοζόμενης στις δυναμικές αλλαγές του διαύλου και τις εκάστοτε απαιτήσεις QoS.

Στο Σχ.2.4 φαίνεται το λειτουργικό διάγραμμα μιας δορυφορικής ζεύξης που υποστηρίζεται από ACM σύμφωνα με τις προδιαγραφές του DVB-S2 και αποτελείται από την πύλη κίνησης που περιλαμβάνει το διαμορφωτή ACM του DVB-S2, το δορυφόρο και το RCST που επικοινωνεί με την πύλη κίνησης μέσω της ζεύξης επιστροφής. Στην περίπτωση του προτύπου DVB-S2 η ζεύξη επιστροφής είναι μια σύνδεση dial-up.

Το πρότυπο DVB-S2 είναι τόσο ευέλικτο που μπορεί να συνυπάρξει με οποιονδήποτε από τους υπάρχοντες τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους, να παράσχει μεγάλη ποικιλία φασματικής



Σχήμα 2.4: Λειτουργικό διάγραμμα μιας ζεύξης DVB-S2 με ACM.

απόδοσης (spectrum efficiency) και να ικανοποιήσει ποικιλία απαιτήσεων σε σηματοθορυβική σχέση *C/N*. Επιπλέον, δεν περιορίζεται στην κωδικοποίηση video και ήχου MPEG-2 αλλά είναι σχεδιασμένο με τη δυνατότητα να χειρίζεται μια ποικιλία από τυποποιήσεις ήχου-video και δεδομένων συμπεριλαμβανομένων των τυποποιήσεων που το DVB υιοθέτησε πρόσφατα για μελλοντικές εφαρμογές. Το DVB-S2 προτυποποιεί οποιαδήποτε τυποποίηση ροής εισόδου, συμπεριλαμβανομένων συνεχών ροών δεδομένων, απλών ή πολλαπλών ροών μεταφοράς MPEG, εφαρμογές IP καθώς και πακέτα ATM (Asynchronous Transfer Mode). Με τον τρόπο αυτό επιτρέπει τη χρήση σύγχρονων ή και μελλοντικών σχημάτων δεδομένων χωρίς την ανάγκη νέων προδιαγραφών. Το υποσύστημα μετάδοσης του προτύπου αποτελείται από τις εξής υπομονάδες [8], [9] όπως απεικονίζονται στο Σχ.2.5:

 Προσαρμογή της μεθόδου (mode adaptation): Το πρότυπο υποστηρίζει τρεις μεθόδους λειτουργίας ανάλογα με την εφαρμογή: Σταθερή κωδικοποίηση και διαμόρφωση (Constant Coding Modulation, CCM), Μεταβλητή κωδικοποίηση και διαμόρφωση (Variable Coding and Modulation, VCM) και προσαρμοστική κωδικοποίηση και διαμόρφωση (Adaptive Coding and Modulation, ACM).

- Η σταθερή κωδικοποίηση και διαμόρφωση CCM αποτελεί την πιο απλή μέθοδο λει-



Σχήμα 2.5: Υποσύστημα μετάδοσης του προτύπου DVB-S2.

τουργίας που υϊοθετείται και από το DVB-S. Σύμφωνα με αυτή, όλα τα πλαίσια διαμορφώνονται και κωδικοποιούνται με τις ίδιες καθορισμένες παραμέτρους.

- Η μεταβλητή κωδικοποίηση και διαμόρφωση VCM μπορεί να εφαρμοστεί για να παρέχει διαφορετικά επίπεδα προστασίας από λάθη σε διαφορετικές υπηρεσίες. Στην πραγματικότητα, το πρότυπο DVB-S2 υποστηρίζει τη μετάδοση διαφορετικών υπηρεσιών στο ίδιο φέρον, που η καθεμία λειτουργεί με το δικό της σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Η μεταβλητή κωδικοποίηση και διαμόρφωση πραγματοποιεί ένα είδος πολύπλεξης στο φυσικό στρώμα για την παροχή διακριτών υπηρεσιών με διαφορετικά χαρακτηριστικά.
- Η προσαρμοστική κωδικοποίηση και διαμόρφωση ACM εφαρμόζεται από το πρότυπο στην περίπτωση διαδραστικών εφαρμογών σημείου προς σημείο. Η προσαρμοστική κωδικοποίηση και διαμόρφωση επιτρέπει τη δυναμική μεταβολή του ρυθμού κώδικα και του σχήματος διαμόρφωσης ανά πλαίσιο ανάλογα με τις μετρούμενες συνθήκες του διαύλου στον παραλήπτη του πλαισίου. Ο αποστολέας λαμβάνει δυναμικά πληροφορίες για τις συνθήκες λήψης μέσω της ζεύξης επιστροφής.
- Προσαρμογή της ροής (stream adaptation): Η λειτουργία αυτή εφαρμόζεται για τη δη-

μιουργία ενός πλαισίου κύριας ζώνης (Base Band FRAME, BBFRAME) σταθερής διάρκειας *K*_{BCH}. Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου τα προς μετάδοση δεδομένα του χρήστη δεν επαρκούν για να γεμίσουν πλήρως ένα BBFRAME.

- Προσαρμοστική κωδικοποίηση FEC: Για την επίτευξη της βέλτιστης εξισορρόπησης επίδοσης και πολυπλοκότητας, το DVB-S2 αξιοποιεί τις πλέον σύγχρονες τάσεις στην κωδικοποίηση διαύλου [8]. Συγκεκοιμένα, ενσωματώνει την κωδικοποίηση ελέγχου ισοτιμίας χαμηλής πυκνότητας (Low Density Parity Check, LDPC) για εσωτερική κωδικοποίηση, ενώ η εξωτερική κωδικοποίηση πραγματοποιείται με χρήση κωδικοποιήσης BCH (Bose-Chaundhuri-Hocquenghem). Ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος και το σχήμα διαμόρφωσης, είναι δυνατή η επιλογή ανάμεσα στους ουθμούς κώδικα 1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9 και 9/10 για τον εσωτερικό κώδικα LDPC. Οι ρυθμοί κώδικα 1/4, 1/3 και 2/5 προβλέπονται για χρήση σε συνδυασμό με διαμόρφωση QPSK για ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες του δορυφορικού διαύλου, όταν το επίπεδο του σήματος είναι συγκρίσιμο ή και χαμηλότερο από το επίπεδο θορύβου. Ανάλογα με την εφαρμογή τα κωδικοποιημένα κατά FEC πλαίσια (FECFRAME) έχουν μήκος 64800 (κανονικό FECFRAME) ή 16200 bits (σύντομο FECFRAME). Τα κανονικά FEC πλαίσια χαρακτηρίζονται από αυξημένη ανθεκτικότητα σε λάθη, συγχρόνως, όμως, αυξάνουν την καθυστέρηση μετάδοσης λόγω αύξησης του χρόνου αποκωδικοποίησης. Έτσι, για εφαρμογές που δεν είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση, όπως η ευρυεκπομπή, τα κανονικά FEC πλαίσια αποτελούν τη βέλτιστη λύση, ενώ για διαδραστικές εφαρμογές, που είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση, το σύντομο FEC πλαίσιο είναι αποτελεσματικότερο αφού ένα μικρού μήκους πακέτο μπορεί να προωθηθεί άμεσα από το σταθμό εκπομπής.
- Προσαρμοστική διαμόρφωση: Όσον αφορά το σχήμα διαμόρφωσης, το DVB-S2 υποστηρίζει τέσσερα σχήματα διαμόρφωσης (QPSK, 8PSK, 16APSK και 32APSK). Τα σχήματα QPSK και 8PSK προτείνονται για εφαρμογές ευρυεκπομπής, διότι αποτελούν σχήματα διαμόρφωσης σταθερής περιβάλλουσας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε μη γραμμικούς ενισχυτές που λειτουργούν κοντά στον κόρο. Τα σχήματα 16APSK και 32APSK προορίζονται κυρίως για επαγγελματικές εφαρμογές. Ωστόσο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για υπηρεσίες ευρυεκπομπής, αλλά στην περίπτωση αυτή απαιτούν υψηλότερη σηματοθορυβική σχέση και την υϊοθέτηση εξελιγμένων μεθόδων για την αντιμετώπιση της

παραμόρφωσης που εισάγεται λόγω της μη γραμμικής λειτουργίας του ενισχυτή της ανοδικής ζεύξης. Ενώ τα σχήματα αυτά δεν παρουσιάζουν χαμηλότερη απόδοση ισχύος σε σχέση με τα προηγούμενα, εμφανίζουν μεγαλύτερη φασματική απόδοση και έχουν σχεδιασθεί για λειτουργία σε μη-γραμμικούς ενισχυτές διατηρώντας επίδοση συγκρίσιμη με αυτή των σχημάτων 16QAM και 32QAM. Με την κατάλληλη επιλογή σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, το πρότυπο προσφέρει φασματική απόδοση που κυμαίνεται από 0.5 μέχρι 4.5 bits/symbol. Η επιλογή του παράγοντα εξάπλωσης (roll-off factor) γίνεται μεταξύ των τιμών 0.35 - όπως στο DVB-S - 0.20 και 0.25.

- Πλαισιοποίηση φυσικού στρώματος (Physical Layer Framing): Η υπομονάδα αυτή δημιουργεί το πλαίσιο φυσικού στρώματος (Physical Layer Frame, PLFRAME), ενώ υποστηρίζει κάποιες διεργασίες όπως: σηματοδοσία φυσικού στρώματος, προαιρετική εισαγωγή πιλοτικών συμβόλων και τυχαιοποίηση φυσικού στρώματος για διασπορά ενέργειας.
- Σχηματισμός κύριας ζώνης (Baseband Shaping): Μετά την τυχαιοποίηση το σήμα πρέπει να φιλτραριστεί σε συγκεκριμένη μορφή (square root raised cosine) για τη δημιουργία του τελικού ραδιοσήματος.

2.5 Το πρότυπο DVB-RCS

Το πρότυπο DVB-RCS [10], [11] αποτελεί την προτυποποίηση του ETSI για τη ζεύξη επιστροφής και αποτελεί πολλά υποσχόμενη λύση για την παροχή διαδραστικών υπηρεσιών μέσω δορυφόρου. Οι εργασίες για το πρότυπο αυτό ξεκίνησαν το 1997 και το αντίστοιχο κείμενο δημοσιεύτηκε το Σεπτέμβριο του 2001. Η βασική καινοτομία του προτύπου είναι η ενσωμάτωση μεθόδων για την βέλτιστη και αποδοτική εκμετάλλευση του εύρους ζώνης με σκοπό την υποστήριξη των διαρκώς αναπτυσσόμενων υπηρεσιών IP. Για το σκοπό αυτό σχήματα εκχώρησης εύρους ζώνης ανάλογα με τη ζήτηση BoD έχουν ενσωματωθεί στο πρότυπο DVB-RCS για την βελτίωση της χρησιμοποίησης των δορυφορικών πόρων παρουσία διαφορετικών ειδών κίνησης.

Το DVB-RCS στηρίζεται στη χρήση του ήδη υπάρχοντος προτύπου DVB-S για τη ζεύξη διαβίβασης. Στο DVB-RCS, η ζεύξη υλοποιείται με πολύπλεξη στο πεδίο του χρόνου TDM, με ρυθμούς μετάδοσης που φθάνουν μέχρι κάποιες δεκάδες Mbps. Η ανάπτυξη του Διαδικτύου και η ανάγκη για διαδραστικότητα με τα προηγούμενα πρότυπα (MPEG που υποστήριζε το DVB-S) υπαγόξευσαν τη χρήση του προτύπου DVB-S ως έχει στη ζεύξη διαβίβασης, αξιοποιώντας τα υπάρχοντα πακέτα MPEG για μεταφορά των πακέτων IP. Συνεπώς, δημιουργήθηκε η ανάγκη για ένα επιπρόσθετο στοιχείο στη ζεύξη διαβίβασης, το ποίο θα ενθυλακώνει τα πακέτα IP σε κελιά MPEG σύμφωνα με τις προδιαγραφές του DVB [12].

Η ζεύξη επιστροφής του DVB-RCS βασίζεται σε ένα σχήμα πολλαπλής προσπέλασης διαίρεσης χρόνου πολλαπλών συχνοτήτων MF-TDMA κατά το οποίο εκχωρούνται πολλαπλά φέροντα για την πρόσβαση στη ζεύξη επιστροφής ενώ για κάθε φέρον ο χρόνος διαιρείται σύμφωνα με τη μέθοδο TDMA. Το υποσύστημα διαχείρισης της κατανομής των πόρων ενσωματώνεται στο κέντρο ελέγχου του δικτύου (NCC) και κατανέμει τους πόρους στα τερματικά ανάλογα με το προφίλ των αντίστοιχων χρηστών και τους διαθέσιμους πόρους του συστήματος. Το κέντρο ελέγχου NCC μπορεί να ελέγχει περισσότερα από ένα δορυφορικά δίκτυα. Συνεπώς, σε ένα κέντρο NCC μπορούν να συνδέονται περισσότερα του ενός συστήματα ανοδικής και καθοδικής ζεύξης. Επίσης, το NCC είναι υπεύθυνο για το συγχρονισμό του συστήματος παρέχοντας τη χρονική αναφορά του δικτύου (network clock reference). Ο συγχρονισμός πραγματοποιείται με την αποστολή στα τερματικά συγκεκριμένων πινάκων που αφορούν το σύστημα ώστε να γίνονται διαθέσιμες σε αυτά όλες οι απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τη λήψη και τη μετάδοση δεδομένων. Εκτός από τους πίνακες που ήδη υπάρχουν στο πρότυπο DVB-S, οι πληροφορίες αυτές περιλαμβάνουν πίνακες με πληροφορίες για τη δομή του πλαισίου, την κατανομή των πόρων και τον έλεγχο του συγχρονισμού των τερματικών.

Το πρότυπο προβλέπει τέσσερα είδη χρονοσχισμών, τις χρονοσχισμές κίνησης (TRaFfic, TRF), τις χρονοσχισμές συγχρονισμού (SYNChronization, SYNC), τις χρονοσχισμές κοινής σηματοδοσίας του διαύλου (Common Signaling Channel, CSC) και τις χρονοσχισμές κτήσης (ACQuisition, ACQ). Οι χρονοσχισμές TRF χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των δεδομένων από το RCST στον κεντρικό επίγειο σταθμό ή σε άλλο RCST. Δύο είδη καταιγισμών TRF προβλέπονται από τι πρότυπο, ο ένας για τη μεταφορά κελιών ATM και ο άλλος για πακέτα MPEG-2. Οι χρονοσχισμές SYNC χρησιμοποιούνται από ένα RCST για τη διατήρηση του συγχρονισμού και την αποστολή πληροφοριών ελέγχου στο σύστημα. Η συχνότητα με την οποία χρησιμοποιούνται χρονοσχισμές SYNC εξαρτάται από τις δυνατότητες του NCC. Οι χρονοσχισμές CSC χρησιμοποιούνται από ένα RCST μόνο για την ταυτοποίησή του κατά την εισαγωγή του στο σύστημα, ενώ οι χρονοσχισμές ACQ χρησιμοποιούνται προαιρετικά για την εξασφάλιση συγχρονισμού ποιν τη λειτουργική χρήση

50

του δικτύου από ένα RCST.

Επιπλέον το πρότυπο υποστηρίζει δύο είδη τερματικών RCST, τερματικά τύπου Α και τερματικά τύπου Β. Τα τερματικά τύπου Α μπορούν υποστηρίξουν μόνο κίνηση IP, ενώ τα τερματικά τύπου Β λειτουργούν ως τερματικά τύπου Α και, επιπλέον, υποστηρίζουν κατεξοχήν πρωτόκολλα ΑΤΜ ενθυλακώνοντας τα κελιά ΑΤΜ σε κίνηση μεταφοράς MPEG.

Για την επίτευξη της βέλτιστης αξιοποίησης του εύρους ζώνης, που αποτελεί τον κύριο στόχο του προτύπου, πρέπει να επιλέγονται τα κατάλληλα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης σε σχέση με τις συνθήκες μετάδοσης και το είδος της κίνησης. Το DVB-RCS ακολούθησε τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν από το ήδη υπάρχον πρότυπο DVB-S. Έτσι το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται είναι το QPSK, ενώ ως εξωτερική κωδικοποίηση χρησιμοποιείται η ίδια ελαττωμένη εκδοχή του κώδικα RS που χρησιμοποιεί και το DVB-S. Η προκύπτουσα κωδικοποιημένη κατά RS(204, 188) λέξη έχει διορθωτική ικανότητα ίση με t = 8 bytes. Την εξωτερική κωδικοποίηση RS διαδέχεται η εσωτερική συνελικτική κωδικοποίηση που είναι σε θέση να παρέχει διαφορετικά επίπεδα προστασίας από λάθη διαθέτοντας προς τούτο τους ρυθμούς κώδικα 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 και 7/8. Η επιλογή του ρυθμού κώδικα πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Οι προαναφερθείσες δυνατότητες αποτελούν βασικές επιλογές του προτύπου DVB-RCS το οποίο, ωστόσο, παρέχει και τη δυνατότητα επιλογής μιας πλέον εύρωστης εσωτερικής Turbo κωδικοποίησης. Στην πεείπτωση της Turbo κωδικοποίησης το πρότυπο υποστηρίζει επτά ρυθμούς κωδικοποίησης 1/3, 2/5, 1/2, 2/3, 3/4, 4/5 και 6/7. Το κέρδος της Turbo κωδικοποίησης σε σύγκριση με τη συνελικτική κωδικοποίηση κυμαίνεται από 1.5 μέχρι 2 dB, ανάλογα με το ρυθμό κώδικα και το μέγεθος της μεταδιδόμενης πληροφορίας (μήκος καταιγισμού). Στη συνέχεια, αναλύονται οι προδιαγραφές του προτύπου σε σχέση με την οργάνωση του εύρους ζώνης και τις μεθόδους κατανομής των πόρων.

2.5.1 Διαίφεση της Χωφητικότητας

Η ζεύξη επιστροφής του DVB-RCS στηρίζεται σε ένα σχήμα MF-TDMA σύμφωνα με το οποίο για την πρόσβαση στη ζεύξη εκχωρούνται πολλαπλά φέροντα, ενώ για κάθε φέρον ο χρόνος υποδιαιρείται σύμφωνα με τη μέθοδο TDMA. Πρόκειται, λοιπόν, για ένα υβριδικό σχήμα TDMA και FDMA, όπου η χρήση κάθε συχνότητας μοιράζεται χρονικά σε ένα αριθμό χρονοσχισμών

$\begin{array}{c} \begin{array}{c} Superframe \\ counter \\ 14 \end{array} & \begin{array}{c} Superframe \\ counter \\ 15 \end{array} & \begin{array}{c} Superframe \\ counter \\ 16 \end{array} \\ \hline \\ Superframe \\ counter \end{array} & \begin{array}{c} Superframe \\ Superframe \\ counter \end{array} & \begin{array}{c} Superframe \\ Superframe \\ counter \end{array} & \begin{array}{c} Superframe \\ counter \end{array} \\ \hline \\ \end{array}$	ruzvothta	_
Superframe_id 2 Superframe Superframe Superframe counter counter counter counter	Superframe counter 14	
Superframe Superframe Superframe counter counter		_
236 237 238 239 x	perframe S counter 236	χρόνο

Σχήμα 2.6: Τυπικό παράδειγμα υπερπλαισίων σε ένα Διαδραστικό δορυφορικό δίκτυο.

(timeslots). Μάλιστα, η χωρητικότητα κατανέμεται μεταξύ των τερματικών μέσω της ανάθεσης συγκεκριμένου πλήθους χρονοσχισμών. Από το πρότυπο τίθεται ο περιορισμός ότι κάθε τερματικό δεν μπορεί να εκπέμπει την ίδια χρονική στιγμή σε περισσότερες από μία συχνότητες για να αποφεύγεται η δημιουργία προϊόντων ενδοδιαμόρφωσης.

Οι χρονοσχισμές εκχωρούνται δυναμικά στα τερματικά με βάση τις αιτήσεις τους και τη διαθεσιμότητα πόρων. Η κατανομή των πόρων πραγματοποιείται από το υποσύστημα κατανομής των πόρων το οποίο εκτελεί κατάλληλο πρωτόκολλο. Οι κατανομές των πόρων γνωστοποιούνται στα τερματικά μέσω του χρονοδιαγράμματος μετάδοσης τερματικού TBTP (Terminal Burst Time Plan) που εκπέμπεται από το NCC για να ενημερώνει τα τερματικά ποιες χρονοσχισμές του πλαισίου μπορούν να καταλάβουν για εκπομπή δεδομένων. Το πρότυπο DVB-RCS περιγράφει τη χρήση υπερπλαισίων, πλαισίων και χρονοσχισμών του MF-TDMA αποσκοπώντας στην οργάνωση και αρίθμηση των χρονοσχισμών ώστε το δίκτυο να είναι σε θέση να εκχωρήσει τη διαθέσιμη χωρητικότητα στα τερματικά. Ακολουθεί η περιγραφή των συγκεκριμένων υποδιαιρέσεων του χρόνου μετάδοσης:

 Υπεφπλαίσιο (Superframe): Σύμφωνα με το πρότυπο DVB-RCS, το υπεφπλαίσιο αποτελεί το μεγαλύτερο υπερσύνολο από φέροντα και χρονοσχισμές. Για τον προσδιορισμό του τμήματος των πόρων της ζεύξης επιστροφής που χρησιμοποιείται από τα τερματικά RCST για τις μεταδόσεις τους κάθε υπερπλαίσιο αναγνωρίζεται από τον αριθμό ταυτότητας

^	συχνότητα	Superframe_counter			
	F_nb 6	F_nb 8 F_nb 5	F_nb 7		
	F_nb	F_nb 3	F_nb 4		
	2	F_nb 0	F_nb 1	χρόνος	

Σχήμα 2.7: Παράδειγμα δομής υπερπλαισίου.

υπεφπλαισίου (Superframe_ID, SF_ID). Στο Σχ.2.6 απεικονίζεται ένα τυπικό παφάδειγμα υπεφπλαισίων, όπου οι ταυτότητες υπεφπλαισίου SF_ID αντιστοιχούν σε διαφοφετικά σύνολα φεφουσών συχνοτήτων. Σε ένα δοφυφοφικό δίκτυο η συνολική χωφητικότητα της ζεύξης επιστφοφής μποφεί να κατανεμηθεί μεταξύ ομάδων τεφματικών και, στη συνέχεια, το δίκτυο να διαχειφισθεί χωφιστά τις αντίστοιχες ταυτότητες υπεφπλαισίων.

Όπως φαίνεται από το Σχ.2.6, τα διαδοχικά υπεφπλαίσια μιας δεδομένης ταυτότητας υπεφπλαισίου είναι συνεχόμενα στο χρόνο. Κάθε υπεφπλαίσιο αριθμείται με ένα αριθμό που ονομάζεται μετρητής υπεφπλαισίων (Superframe counter, SF_counter). Για κάθε υπεφπλαίσιο γνωστής ταυτότητας, η κατανομή των χρονοσχισμών γνωστοποιείται στα τερματικά μέσω του TBTP. Κάθε τερματικό μπορεί να μεταδώσει μόνο στις χρονοσχισμές που του έχουν εκχωρηθεί. Η διάρκεια ενός υπεφπλαισίου είναι η μεγαλύτερη χρονική περίοδος κατανομής των πόρων στα τερματικά.

• Πλαίσιο (Frame): Κάθε υπεφπλαίσιο αποτελείται από πεφισσότεφα πλαίσια που χωφίζονται σε χφονοσχισμές. Το πλαίσιο είναι μια ενδιάμεση διάφκεια μετάδοσης μεταξύ των υπεφπλαισίων και των χφονοσχισμών. Εισάγεται με στόχο τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της ευελιξίας όσον αφοφά τη σηματοδοσία του δικτύου. Η διάφκεια του πλαισίου δεν σχετίζεται άμεσα με κάποια από τις διαθέσιμες διαδικασίες του DVB-RCS για την κατανομή των πόφων. Σε ένα υπεφπλαίσιο, τα πλαίσια αφιθμούνται από 0 (που αντιστοιχεί

ουχνότη	τα.	Frame_id 17		
TS_nb 7	TS_nb 8		TS_nb 9	
TS_nb 3	TS nb 4	TS nb 5	TS_nb 6	
TS_nb 0	TS_nb 1		TS_nb 2	χρόνος

Σχήμα 2.8: Παράδειγμα δομής πλαισίου.

στο πρώτο χρονικά πλαίσιο με τη χαμηλότερη συχνότητα) μέχρι Ν (που αντιστοιχεί στο τελευταίο χρονικά πλαίσιο με την υψηλότερη συχνότητα), ταξινομημένα πρώτα σε σχέση με το χρόνο και μετά σε σχέση με τη συχνότητα, όπως φαίνεται στο Σχ.2.7. Το Ν πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο του 31. Τα πλαίσια ενός υπερπλαισίου μπορεί να μην έχουν όλα την ίδια διάρκεια και εύρος ζώνης. Όπως θα εξηγηθεί ακολούθως, αυτό εξαρτάται από τις παραμέτρους μετάδοσης.

• Χρονοσχισμές (Timeslots): Κάθε πλαίσιο αποτελείται από χρονοσχισμές. Η ταυτότητα πλαισίου (Frame_id, F_id) προσδιορίζει την οργάνωση των χρονοσχισμών που το αποτελούν. Σε κάθε πλαίσιο, οι χρονοσχισμές αριθμούνται από 0 (που αντιστοιχεί στην πρώτη χρονικά χρονοσχισμή με τη χαμηλότερη συχνότητα) μέχρι Μ (που αντιστοιχεί στην τελευταία χρονικά χρονοσχισμή με την υψηλότερη συχνότητα) ταξινομημένες πρώτα στο χρόνο και μετά στη συχνότητα όπως φαίνεται στο Σχ.2.8. Το Μ πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο από 2047. Για τους σκοπούς της κατανομής των πόρων, κάθε χρονοσχισμή προσδιορίζεται με μοναδικό τρόπο από τέσσερις αριθμούς:i) την ταυτότητα του υπερπλαισίου SF_ID, ii) το μετρητή υπερπλαισίου SF_counter, iii) τον αριθμό πλαισίου F_nb και iv) τον αριθμό χρονοσχισμής TS_nb.



🔳 Εκχωρηθείσες χρονοσχισμές (πόροι)

Σχήμα 2.9: Διαίφεση της συνολικής χωφητικότητας στο σύστημα DVB-RCS ανά υπεφπλαίσια, πλαίσια και χφονοσχισμές.

Στο Σχ.2.9 σχεδιάζεται ένα παφάδειγμα διαίφεσης της συνολικής χωφητικότητας στο σύστημα DVB-RCS ανά υπεφπλαίσια, πλαίσια και χφονοσχισμές. Στο συγκεκφιμένο παφάδειγμα απεικονίζονται δύο διαδοχικά υπεφπλαίσια με ίδια ταυτότητα υπεφπλαισίου, οπότε έχουν την ίδια δομή. Κάθε υπεφπλαίσιο αποτελείται από 9 πλαίσια τα οποία αφιθμούνται κυκλικά με το 0 να αντιστοιχεί στο πφώτο χφονικά πλαίσιο με τη χαμηλότεφη συχνότητα και το 8 στο τελευταίο χφονικά πλαίσιο με τη χαμηλότεφη συχνότητα και το 8 στο τελευταίο χφονικά πλαίσιο με τη χαμηλότεφη συχνότητα και το 8 στο τελευταίο αποτελείται από 4 φέφοντα και κάθε φέφον από 128 χφονοσχισμές. Το TBTP αποστέλλεται στα τεφματικά RCSTs στην αφχή κάθε υπεφπλαισίου. Στο Σχ.2.9 απεικονίζεται ένα παφάδειγμα χφονοσχισμών που έχουν εκχωφηθεί σε ένα τεφματικό. Επισημαίνεται ότι ένα τεφματικό δεν μποφεί να μεταδίδει την ίδια χφονική στιγμή σε πεφισσότεφα από ένα φέφοντα.

Στη συνέχεια, παφουσιάζεται ένα παφάδειγμα κατανομής της χωφητικότητας στη ζεύξη επιστφοφής όπου φαίνεται η δυναμική μεταβολή της σύνθεσης του πλαισίου ανάλογα με τις απαιτήσεις της κίνησης που επιθυμούν να μεταδώσουν τα τεφματικά RCSTs. Επίσης, για δεδομένη διάφκεια πλαισίου παφουσιάζεται ο τφόπος υπολογισμού του αφιθμού των χφονοσχισμών που λαμβάνει κάθε τεφματικό RCST ανάλογα με το φυθμό μετάδοσης των δεδομένων του καθώς και η τοποθέτηση των διαφόφων ειδών χφοχοσχισμών που πφοβλέπει το πφότυπο μέσα στο πλαίσιο.

Παράδειγμα Κατανομής της Χωρητικότητας στη ζεύξη επιστροφής

Για το συγκεκριμένο παράδειγμα θεωρείται η διαίρεση της χωρητικότητας της ζεύξης επιστροφής σύμφωνα με τον ορισμό του σταθερού πλαισίου MF-TDMA και τη μετάδοση κίνησης ATM. Υποστηρίζονται οι εξής τέσσερις μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων: 144kbps, 384kbps, 1024kbps και 2048kbps.

Σε κάθε RCST εκχωρείται συγκεκριμένος ρυθμός μετάδοσης με κριτήριο τις δυνατότητές του, το είδος κίνησης που επιθυμεί να μεταδώσει και τις συνθήκες διάδοσης. Οι καταιγισμοί κίνησης που μεταδίδονται στις χρονοσχισμές TRF, περιέχουν ένα κελί ATM. Όλοι οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων εφαρμόζονται στα 53 bytes που περιέχονται σε ένα κελί ATM. Συνεπώς, οι προαναφερθέντες ρυθμοί μετάδοσης είναι διαθέσιμοι στους χρήστες RCST τύπου Β. Στην περίπτωση των RCST τύπου Α απαιτούνται πρόσθετα bits για την ενθυλάκωση των δεδομενογραφημάτων IR. Η κωδικοποίηση για διόρθωση λαθών και το προοίμιο (preamble) των καταιγισμών κίνησης εξαρτάται από το ισοζύγιο της ζεύξης συμπεριλαμβανομένης της απόδοσης του αποκωδικοποιητή. Τα προηγούμενα προσδιορίζουν τη διάρκεια των χρονοσχισμών TRF. Οι χρονοσχισμές CSC και ACQ έχουν την ίδια διάρκεια με τις χρονοσχισμές TRF, καίτοι οι πραγματικοί καταιγισμοί μπορεί να είναι μικρότερης διάρκειας από αυτή των χρονοσχισμών. Η διάρκεια των χρονοσχισμών SYNC είναι η μισή της διάρκειας των χρονοσχισμών TRF.

Το πλαίσιο αποτελείται από πολλαπλά φέροντα ενώ κάθε φέρον υποδιαιρείται σε ένα αριθμό χρονοσχισμών. Κάθε πλαίσιο έχει διάρκεια 26.5 ms. Ο αριθμός και n σύνθεσn των χρονοσχισμών ανά πλαίσιο προσδιορίζεται από το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να υποστηριχθεί από το πλαίσιο. Ο Πιν.2.1 δείχνει τη σύνθεση του πλαισίου με βάση το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης. Σε κάθε φέρον του πλαισίου είναι διαθέσιμες είτε χρονοσχισμές CSC και ACQ είτε SYNC, όπως φαίνεται από τις δύο γραμμές που αντιστοιχούν σε κάθε ρυθμό μετάδοσης. Ο αριθμός των χρονοσχισμών κίνησης σε κάθε ρυθμό μετάδοσης επιτρέπει την εκχώρηση ρυθμών μετάδοσης που είναι πολλαπλάσιοι των 16 kbit/s. Με την εκχώρηση *n* χρονοσχισμών σε κάθε πλαίσιο, το RCST έχει τη δυνατότητα να μεταδώσει με ρυθμό μετάδοσης πολλαπλάσιο των 16 kbit/s. Οι πρόσθετες χρονοσχισμές, δηλαδή οι χρονοσχισμές CSC, ACQ και SYNC, τοποθετούνται σε κάθε φέρον στην αρχή του πλαισίου, όπως απεικονίζεται στο $\Sigma_{2.2.10}$. Το εύρος ζώνης ενός πλαισίου είναι μικρό-

56

Μέγιστος	Χρονοσχισμές ανά φέρον και ανά πλαίσιο					
Ρυθμός μετάδοσης	TRF	CSC / ACK	SYNC	Ολικός αριθμός χρονοσχισμών	ανά πλαίσιο	
144 kbit/s	9	1	0	10	60	
		0	2			
384 kbit/s	24	2	0	26	23	
		0	4			
1 024 kbit/s	bit/s 64	4	0	68	9	
		0	8			
2 048 kbit/s	128	8	0	136	4	
		0	16			

Πίνακας 2.1: Σύνθεση πλαισίου.



Σχήμα 2.10: Παράδειγμα σύνθεσης πλαισίου.

τερο ή ίσο του εύρους αναπήδησης συχνοτήτων των RCSTs, που είναι 20 MHz στο παράδειγμα αυτό. Ο αριθμός των φερόντων σε αυτό το εύρος ζώνης προκύπτει από το ρυθμό συμβόλου, ο οποίος εξαρτάται από την κωδικοποίηση για διόρθωση λαθών. Οι χρονοσχισμές SYNC εκχωρούνται ανά 32 πλαίσια. Συνεπώς, κάθε τερματικό μεταδίδει ένα καταιγισμό συγχρονισμού κάθε 848 ms.

2.5.2 Μηχανισμοί ικανοποίησης αιτημάτων κίνησης στο DVB-RCS

Σε κάθε τερματικό RCST υπάρχουν διαθέσιμοι δύο μηχανισμοί προώθησης αιτημάτων κίνησης προς το NCC. Το αίτημα εκτός ζώνης (Out-of-band request, OBR), η μετάδοση του οποίου γίνεται σε διαφορετικό εύρος ζώνης από αυτό των δεδομένων και συνίσταται σε ένα μικρό καταιγισμό που εκπέμπουν περιοδικά όλα τα RCST που συμμετέχουν στο δίκτυο. Σκοπός του μηνύματος είναι να μεταφέρει πληροφορίες ελέγχου και διαχείρισης του δικτύου από τα τερματικά RCST στο NCC. Επίσης, χρησιμοποιείται για τη διατήρηση του συγχρονισμού των τερματικά RCST. Εναλλακτικά, η δυνατότητα εκπομπής καταιγισμού μπορεί να εκχωρείται στα τερματικά RCST μέσω μιας ανταγωνιστικής διαδικασίας με ένα κυκλικό μηχανισμό round-robin.

Το αίτημα για εκχώρηση κίνησης που γίνεται στο ίδιο εύρος ζώνης με τα δεδομένα ονομάζεται αίτημα εντός ζώνης (In-band request, IBR) και αποτελείται από ένα προαιρετικό πρόθεμα που προστίθεται στους καταιγισμούς κίνησης ATM. Το πρόθεμα περιλαμβάνει πληροφορίες ελέγχου και διαχείρισης του δικτύου. Είναι φανερό ότι η χρήση της σηματοδοσίας IBR μειώνει την πλεονάζουσα πληροφορία σε σχέση με τη σηματοδοσία OBR. Επίσης, εμφανίζει το σημαντικό πλεονέκτημα ότι δεν επηρεάζεται από απώλειες λόγω ταυτόχρονης μετάδοσης πακέτων (packet collision). Για το λόγο αυτό, τα τερματικά RCST στα οποία έχουν ήδη εκχωρηθεί χρονοσχισμές δεδομένων ενσωματώνουν σε αυτές τα αιτήματά τους (σηματοδοσία IBR), ενώ οι σχισμές OBR κατανέμονται μεταξύ των RCST στα οποία δεν έχει γίνει ακόμα κάποια εκχώρηση.

2.5.3 Κατηγορίες αιτημάτων για κατανομή των πόρων

Σε ένα δοφυφοφικό δίκτυο DVB-RCS τα τεφματικά ανταγωνίζονται για τους πόφους της ανοδικής ζεύξης. Ο ανταγωνισμός αυτός αντιμετωπίζεται εφαφμόζοντας πρωτόκολλο του στρώματος MAC για κατανομή της χωφητικότητας που βασίζεται στις διακριτές κατηγορίες χωρητικότητας που υποστηρίζει το DVB-RCS:

- Εκχωρήσεις Συνεχούς Ρυθμού (Continuous Rate Assignment, CRA)
- Δυναμική Χωρητικότητα με Βάση το Ρυθμό Μετάδοσης (Rate Based Dynamic Capacity, RBDC)
- Δυναμική Χωρητικότητα με Βάση τον Όγκο Δεδομένων (Volume Based Dynamic Capacity, VBDC)
- Δυναμική Χωρητικότητα με Βάση τον Απόλυτο Όγκο Δεδομένων (Absolute Volume Based Dynamic Capacity, AVBDC)
- Εκχώρηση της Ελεύθερης Χωρητικότητας (Free Capacity Assignment, FCA)

Η CRA είναι μέθοδος εκχώρησης σταθερού εύρους ζώνης, ενώ οι εκχωρήσεις RBDC, VBDC και AVBDC είναι σχήματα BoD. Τέλος, με τη μέθοδο FCA το NCC εκχωρεί τους πόρους που έχουν μείνει αχρησιμοποίητοι μετά την ικανοποίηση των άλλων αιτημάτων χωρητικότητας χωρίς κάποια αίτηση από τα τερματικά. Κατά την εκχώρηση των χρονοσχισμών, το NCC υϊοθετεί την ακόλουθη σειρά προτεραιότητας:

$$CRA > RBDC > A(VBDC) > FCA$$
 (2.1)

Παρακάτω παρατίθενται λεπτομέρειες για τις μεθόδους εκχώρησης χωρητικότητας.

Εκχωρήσεις Συνεχούς Ρυθμού, CRA

Πρόκειται για σταθερή και στατική εκχώρηση πόρων και οι απαιτήσεις αυτού του είδους πρέπει να ικανοποιούνται πλήρως σε κάθε υπερπλαίσιο. Το τμήμα της χωρητικότητας που εκχωρείται σε αυτή την περίπτωση προκύπτει από άμεση διαπραγμάτευση του τερματικού RCST με το NCC. Ένας δεδομένος αριθμός χρονοσχισμών εκχωρείται στο συγκεκριμένο τερματικό σε κάθε υπερπλαίσιο μέχρι να αποσταλλεί από το τερματικό μήνυμα απελευθέρωσης της εκχώρησης. Η CRA αφορά χωρητικότητα για υπηρεσίες με σταθερό ρυθμό μετάδοσης, με προδιαγραφές για ελάχιστη επιτρεπόμενη καθυστέρηση μετάδοσης και διακύμανση της καθυστέρησης μετάδοσης, όπως η κίνηση σταθερού ρυθμού μετάδοσης (Constant Bit Rate, CBR) των δικτύων ATM.

Η μέθοδος εκχώρησης CRA μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τη μέθοδο RBDC για το χειρισμό της κίνησης μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης (Variable Bit Rate, VBR) που δεν

παρουσιάζει ανεκτικότητα στην καθυστέρηση. Στην περίπτωση αυτή, η κατηγορία CRA εγγυάται ένα σταθερό ελάχιστο ανά υπερπλαίσιο και η κατηγορία RBDC παρέχει το πρόσθετο εύρος ζώνης που μεταβάλλεται δυναμικά.

Δυναμική Χωρητικότητα με Βάση το Ρυθμό Μετάδοσης, RBDC

Στην κατηγορία RBDC η χωρητικότητα εκχωρείται δυναμικά με βάση το ρυθμό μετάδοσης που απαιτούν τα τερματικά RCST. Η χωρητικότητα αυτού του είδους είναι ανάλογη των άμεσων απαιτήσεων τις οποίες υποβάλλουν τα τερματικά RCST στο NCC. Κάθε αίτημα ακυρώνει όλα τα προηγούμενα αιτήματα του ίδιου τύπου από το ίδιο τερματικό. Η εκχώρηση υπόκειται σε περιορισμό ως προς το μέγιστο επιτρεπτό ρυθμό μετάδοσης που αποτελεί προϊόν διαπραγμάτευσης του τερματικού με το κέντρο NCC. Για την αποφυγή της άσκοπης δέσμευσης κάποιου τμήματος της χωρητικότητας από το τερματικό RCST, το τελευταίο αίτημα τύπου RBDC που λαμβάνεται από το κέντρο NCC εκπνέει αυτόματα μετά από ένα χρονικό διάστημα. Το διάστημα αυτό έχει προκαθορισμένη διάρκεια 2 υπερπλαισίων. Ωστόσο, μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή μεταξύ 1 και 15 υπερπλαισίων. Οι κατηγορίες CRA και RBDC μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό όπως εξηγήθηκε παραπάνω. Μια τυπική εφαρμογή της μεθόδου RBDC είναι η υποστήριξη της κίνησης διαθέσιμου ρυθμού μετάδοσης (Available Bit Rate, ABR) των δικτύων ΑΤΜ.

Δυναμική Χωρητικότητα με Βάση τον Όγκο Δεδομένων, VBDC

Η VBDC είναι η χωρητικότητα που εκχωρείται δυναμικά με βάση τον όγκο της προς μετάδοση πληροφορίας. Η χωρητικότητα αυτού του είδους παρέχεται με βάση τα άμεσα αιτήματα των τερματικών RCST προς το NCC. Στην περίπτωση αυτή, ωστόσο, τα αιτήματα είναι αθροιστικά, δηλαδή κάθε αίτημα συγκεκριμένου τερματικού προστίθεται στα προηγούμενα. Κάθε αίτημα προσδιορίζει τον απαιτούμενο αριθμό χρονοσχισμών που μπορεί να ικανοποιηθεί σε περισσότερα του ενός υπερπλαίσια. Το άθροισμα του αιτούμενου ρυθμού μετάδοσης από κάθε τερματικό RCST ελαττώνεται κατά την ποσότητα που έχει εκχωρηθεί σε αυτή την κατηγορία σε κάθε υπερπλαίσιο. Η μέθοδος VBDC μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για κίνηση που είναι ανεκτική στη διακύμανση της καθυστέρησης μετάδοσης, όπως η κίνηση απροσδιόριστου ρυθμού μετάδοσης (Unspecified Bit Rate, UBR). Η μέθοδος εκχώρησης VBDC μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τη μέθοδο RBDC για το χειρισμό της κίνησης διαθέσιμου ρυθμού μετάδοσης ABR. Στην περίπτωση αυτή, η μέθοδος VBDC παρέχει πρόσθετο εύρος ζώνης χαμηλής προτεραιότητας από το εγγυημένο όριο που εξασφαλίζει η μέθοδος RBDC.

Δυναμική Χωρητικότητα με Βάση τον Απόλυτο Όγκο Δεδομένων, AVBDC

Η AVBDC είναι η χωφητικότητα που εκχωφείται δυναμικά με βάση τον όγκο της πφος μετάδοση πληφοφοφίας. Η κατηγοφία AVBDC έχει τα ίδια χαφακτηφιστικά με την VBDC, με τη διαφοφά ότι τα αιτήματα από τα τεφματικά RCST είναι απόλυτα, δηλαδή κάθε αίτημα ακυφώνει όλα τα πφοηγούμενα από το ίδιο τεφματικό. Το αίτημα στην πεφίπτωση αυτή πφοσδιοφίζει τον απαιτούμενο αφιθμό χφονοσχισμών που μποφεί να ικανοποιηθεί σε πεφισσότεφα του ενός υπεφπλαίσια. Η συγκεκφιμένη κατηγοφία ενεφγοποιείται αντί της VBDC για την αφχική αίτηση ή όταν υπάφχει κίνδυνος απώλειας των αιτημάτων (π.χ. λόγω δυσμενών συνθηκών στο δίαυλο). Η μέθοδος AVBDC είναι κατάλληλη για την υποστήφιξη των ίδιων κλάσεων κίνησης με την κατηγοφία VBDC.

Εκχώρηση της Ελεύθερης Χωρητικότητας, FCA

Τέλος, η κατηγορία FCA αντιστοιχεί στην εναπομείνασα χωρητικότητα μετά την εκχώρηση χωρητικότητας σε όλες τις υπόλοιπες κατηγορίες. Στην περίπτωση αυτή η εκχώρηση της χωρητικότητας γίνεται αυτόματα χωρίς να προηγείται η υποβολή αιτημάτων από τα τερματικά προς το NCC. Η χωρητικότητα αυτού του είδους δεν μπορεί να προβλεφθεί διότι η διαθεσιμότητά της μεταβάλλεται συνεχώς. Αντίθετα, προβλέπεται ως πρόσθετη χωρητικότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της καθυστέρησης για ορισμένα είδη κίνησης τα οποία είναι ανεκτικά στη διακύμανση της καθυστέρησης μετάδοσης. Οι μέθοδοι CRA και FCA μπορούν να θεωρηθούν ως οι δύο μηχανισμοί που εκχωρούν δυναμικά εύρος ζώνης στα τερματικά χωρίς να προηγείται η υποβολή αίτησης από αυτά. Οι πόροι FCA πρέπει να κατανέμονται στα τερματικά σύμφωνα με τα ακόλουθα κριτήρια:

- Βελτιστοποίηση της επίδοσης του πρωτοκόλλου TCP/IP
- Δίκαιη κατανομή των πόρων στα τερματικά

Οι κατηγορίες RBDC και VBDC είναι σχεδόν ίδιες αλλά διαφοροποιούνται όσον αφορά:

- Τον τύπο του αιτούμενου εύρους ζώνης, ο οποίος εκφράζεται σε όρους ρυθμού μετάδοσης
 στην κατηγορία RBDC και σε όρους πακέτων (χρονοσχισμών) στην κατηγορία VBDC.
- Τα χαφακτηφιστικά των αιτημάτων τα οποία είναι απόλυτα στην κατηγοφία RBDC και αθφοιστικά στην κατηγοφία VBDC.

Η μέθοδος RDBC είναι πιο πολύπλοκη διότι πεφιλαμβάνει μια μέθοδο εκτίμησης του αιτούμενου gυθμού μετάδοσης. Ωστόσο, δίνει τη δυνατότητα καλύτεφης ικανοποίησης των καταιγιστικών χαφακτηφιστικών της εισεφχόμενης κίνησης.

Είτε εμφανίζονται μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό, οι κατηγορίες χωρητικότητας αποτελούν τη βάση των σχημάτων κατανομής εύρους ζώνης, τα οποία με τη σειρά τους επιτυγχάνουν τη διάκριση των υπηρεσιών, την εξασφάλιση της QoS και την αποτελεσματική εκμετάλλευση του εύρους ζώνης στα διάφορα στρώματα του δικτύου.

2.5.4 Στρατηγικές Αιτημάτων Χωρητικότητας

Τα διάφορα είδη κίνησης υποστηρίζονται από διαφορετικές στρατηγικές αιτημάτων χωρητικότητας. Για το λόγο αυτό, και με δεδομένο ότι η κίνηση στα σύγχρονα συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών αναμένεται να είναι μικτή, δηλαδή να αποτελείται από διάφορα είδη, η στρατηγική κατανομής με βάση τη ζήτηση BoD καθίσταται πολύπλοκη και απαιτεί πολύπλοκες στρατηγικές για τον υπολογισμό των πόρων. Οι στρατηγικές αιτημάτων χωρητικότητας αποσκοπούν στον αποτελεσματικό συνδυασμό των κατηγοριών του DVB-RCS ώστε να ικανοποιούνται όσο το δυνατό καλύτερα οι απαιτήσεις QoS και, ταυτόχρονα, να βελτιστοποιείται η αξιοποίηση της ανοδικής ζεύξης. Αυτό επιτυγχάνεται με την αντιστοίχηση των κατηγοριών QoS σε κατηγορίες χωρητικότητας. Κάθε RCST πρέπει να τοποθετεί σε μια ουρά όλη την κίνηση που υπόκειται σε διαφορετικές προτεραιότητες μετάδοσης. Μια ουρά μπορεί να παρέχεται για κάθε μία από τις ακόλουθες προτεραιότητες:

 πραγματικού χρόνου (Real Time, RT), που αντιστοιχεί σε κίνηση που χρησιμοποιεί την κατηγορία χωρητικότητας CRA. Αυτή η κίνηση αντιπροσωπεύει λειτουργία μεταγωγής κυκλώματος με ισχυρούς περιορισμούς όσον αφορά την ανοχή στη χρονική αστάθεια (πχ VoIP και video διάσκεψη)

- μεταβλητού φυθμού (Variable Rate, VR), που αντιστοιχεί σε κίνηση που χρησιμοποιεί την κατηγορία χωρητικότητας RBDC. Δύο υποπροτεραιότητες κίνησης VR είναι πιθανές: ευαίσθητες στη χρονική αστάθεια (jitter sensitive, VR-Real Time ή VR-RT) ή με ανοχή στη χρονική αστάθεια (jitter tolerant, VR-Jitter Tolerant ή VR-JT).
- με ανοχή στη χρονική αστάθεια (Jitter Tolerant, JT), που αντιστοιχεί σε όλα τα άλλα είδη κίνησης που χρησιμοποιούν τις κατηγορίες χωρητικότητας VBDC/AVBDC.

2.5.5 Σηματοδοσία

Το πρότυπο DVB ορίζει ένα σύνολο πινάκων που παρέχουν λεπτομερείς πληροφορίες που αφορούν το δίκτυο ευρυεκπομπής. Αυτοί οι πίνακες αναφέρονται ως πίνακες πληροφορίας υπηρεσιών (Service Information, SI). Σε ένα διαδραστικό δορυφορικό δίκτυο που αποτελείται από ζεύξη διαβίβασης και ζεύξη επιστροφής μέσω δορυφόρου, οι πληροφορίες ελέγχου του μέσου πρόσβασης και οποιαδήποτε σηματοδοσία μεταδίδεται μέσω της ζεύξης διαβίβασης και ακολουθεί τις προδιαγραφές που θέτει το πρότυπο DVB. Τα δεδομένα SI που περιγράφουν την οργάνωση του Διαδραστικού Δορυφορικού Δικτύου δομούνται σε έξι τύπους πινάκων:

- Πίνακας Σύνθεσης Υπεφπλαισίου (Superframe Composition Table, SCT): Ο πίνακας αυτός πεφιγφάφει την υποδιαίφεση του συνολικού διαδφαστικού δοφυφοφικού δικτύου σε υπεφπλαίσια και πλαίσια. Ο πίνακας πεφιέχει για κάθε υπεφπλαίσιο την ταυτότητα υπεφπλαισίου, την κεντφική συχνότητα, τον αφιθμό υπεφπλαισίου και ένα απόλυτο χφόνο έναφξης που εκφφάζεται ως μια τιμή του Ρολογιού Αναφοφάς του Δικτύου (Network Clock Reference, NCR). Κάθε υπεφπλαίσιο διαιφείται πεφαιτέφω σε πλαίσια, κάθε είδος των οποίων ταυτοποιείται ως προς τη δομή του από την ταυτότητα πλαισίου (Frame_id). Τα πλαίσια τοποθετούνται σε σχέση με την κεντφική συχνότητα και το χφόνο έναφξης του υπεφπλαισίου.
- Πίνακας Σύνθεσης Πλαισίου (Frame Composition Table, FCT): Ο πίνακας αυτός περιγράφει τη διαίρεση των πλαισίων σε χρονοσχισμές. Για κάθε ταυτότητα πλαισίου, ο πίνακας περιλαμβάνει τη διάρκεια του πλαισίου, το συνολικό αριθμό χρονοσχισμών που περιέχονται στο πλαίσιο, τους χρόνους έναρξης και την αρχή των συχνοτήτων. Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων μετάδοσης (όπως ρυθμός συμβόλου, ρυθμός κώδικα, προοίμιο κλπ) για

κάθε χρονοσχισμή γίνεται αναφορά μέσω της ταυτότητας χρονοσχισμών στην περιγραφή που περιέχεται στον πίνακα σύνθεσης χρονοσχισμών (TimeSlot Composition Table, TCT).

- Πίνακας Σύνθεσης Χρονοσχισμών (Timeslot Composition Table, TCT): Ο πίνακας αυτός ορίζει τις παραμέτρους μετάδοσης για κάθε ταυτότητα χρονοσχισμών που ταυτοποιείται από την ταυτότητα χρονοσχισμών. Παρέχει πληροφορίες για τις ιδιότητες των χρονοσχισμών όπως το ρυθμό συμβόλου, το ρυθμό κώδικα, το προοίμιο (preamble), το περιεχόμενο της ωφέλιμης πληροφορίας (TRF με κελιά ATM, TRF με πακέτα MPEG2, CSC, ACQ, SYNC).
- Πίνακας Θέσης Δορυφόρου (Satellite Position Table, SPT): Ο πίνακας αυτός περιέχει τα δεδομένα του δορυφόρου που απαιτούνται για την ανανέωση της θέσης του καταιγισμού σε τακτά χρονικά διαστήματα. Ο πίνακας πρέπει να περιέχει τα δεδομένα αυτά για αυτούς τους δορυφόρους που αποτελούν ενεργό τμήμα ενός συγκεκριμένου Διαδραστικού Δορυφορικού Δικτύου.
- Πίνακας Διόθθωσης Μηνυμάτων (Correction Message Table, CMT): Το NCC αποστέλλει τον Πίνακα CMT σε ομάδες τεθματικών RCSTs. Ο στόχος του CMT είναι να συμβουλεύσει τα ενεθνά τεθματικά πεθί των διοθθώσεων που πθέπει να γίνουν στους μεταδιδόμενους καταιγισμούς. Ο πίνακας CMT παθέχει διοθθωτικές τιμές για τη συχνότητα του καταιγισμού, τη χθονική στιγμή εκπομπής και το πλάτος. Ο πίνακας CMT πεθιέχει διοθθώσεις για τα τεθματικά με τους πλέον πρόσφατα ληφθέντες καταιγισμούς ACQ και SYNC.
- Χρονοδιαγράμμα Μετάδοσης Τερματικού (Terminal Burst Time Plan, TBTP): Το μήνυμα αυτό αποστέλλεται από το NCC σε μια ομάδα τερματικών που προσδιορίζεται από συγκεκριμένη ταυτότητα ομάδας (Group_ID), ενώ κάθε επιμέρους τερματικό προσδιορίζεται από μια ταυτότητα εισαγωγής στο σύστημα (Logon_ID). Και οι δύο αυτές ταυτότητες αποδίδονται στο τερματικό τη χρονική στιγμή εισαγωγής στο σύστημα. Το TBTP περιέχει ένα ή περισσότερα πεδία για κάθε τερματικό, κάθε ένα από τα οποία ορίζει την εκχώρηση ενός καταιγισμού από συνεχόμενες χρονοσχισμές. Κάθε εκχώρηση κίνησης περιγράφεται από τον αριθμό της χρονοσχισμής έναρξης και ένα παράγοντα επανάληψης ο οποίος δηλώνει τον αριθμό των διαδοχικών εκχωρήσεων σε διαδοχικά υπερπλαίσια. Το TBTP επιτρέπει την εκχώρηση των χρονοσχισμών μία η περισσότερες φορές. Στην τελευταία περίπτωση

παρέχεται ένας μηχανισμός για την προσθήκη ή αφαίρεση εκχωρήσεων χρονοσχισμών από το ΤΒΤΡ. Το ΤΒΤΡ ορίζει ποιες χρονοσχισμές έχουν εκχωρηθεί σε κάθε τερματικό για μετάδοση μέσα σε ένα υπερπλαίσιο ορίζοντας το φέρον και την έναρξή της. Μετά τη συλλογή όλων των αιτήσεων και τον υπολογισμό των πόρων που θα εκχωρηθούν σε κάθε τερματικό, η δημιουργία του ΤΒΤΡ αποτελεί αντικείμενο του αλγορίθμου εκχώρησης των πόρων που έχει υιοθετήσει το NCC. Στόχος του αλγορίθμου εκχώρησης των πόρων είναι η πλέον αποδοτική χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης. Η γνωστοποίηση του ΤΒΤΡ σε όλα τα τερματικά σε τακτά χρονικά διαστήματα είναι καθοριστικής σημασίας για την αποφυγή συγκρούσεων κατά τις μεταδόσεις από τα τερματικά. Για το λόγο αυτό, το πρότυπο προβλέπει ότι το TBTP ανανεώνεται στην αρχή κάθε υπερπλαισίου ή, ισοδύναμα, σε κάθε αύξηση του μετρητή υπερπλαισίου. Ωστόσο, όταν η διάρκεια του υπερπλαισίου είναι πολύ μεγάλη (το πρότυπο ορίζει ότι το υπερπλαίσιο μπορεί να έχει διάρκεια μέχρι 93.2s), η ανανέωση του ΤΒΤΡ στην αρχή κάθε υπερπλαισίου οδηγεί σε μη αποδεκτούς χρόνους αντίδρασης του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή το TBTP ανανεώνεται περισσότερες από μία φορές κατά τη διάρκεια ενός υπερπλαισίου ανά σταθερό αριθμό πλαισίων. Έτσι, τα διαδοχικά ΤΒΤΡ περιέχουν την ίδια τιμή του μετρητή υπερπλαισίου αλλά διαδοχικές τιμές του μετοητή πλαισίου.

Εκτός από τους ανωτέφω πίνακες Πληφοφοφίας Υπηφεσιών στη σηματοδοσία ανοδικής ζεύξης ανήκει και το Μήνυμα Πληφοφοφίας Τεφματικών (Terminal Information Message, TIM). Το μήνυμα αυτό αποστέλλεται από το NCC είτε σε ένα συγκεκφιμένο τεφματικό που πφοσδιοφίζεται από τη διεύθυνση MAC (μήνυμα unicast) είτε σε όλα τα τεφματικά RCSTs με ευφυεκπομπή χφησιμοποιώντας μια κφατημένη διεύθυνση ευφυεκπομπής MAC και πεφιλαμβάνει στατικές ή ημιστατικές πληφοφοφίες της ζεύξης διαβίβασης όπως για τη σύνθεση του δικτύου. Το μήνυμα αυτό μποφεί να χφησιμοποιηθεί για να διευκολύνει την εξυπηφέτηση ενός RCST από μια διαφοφετική ομάδα δικτύου ή από ένα διαφοφετικό δίκτυο ή να διευκολύνει την εξυπηφέτηση μιας ομάδας RCSTs σε μια διαφοφετική υπηφεσία σηματοδοσίας της ζεύξης διαβίβασης.

Όλοι οι πίνακες SCT, FCT, TCT, SPT και τα μηνύματα TIM ευθυεκπομπής πρέπει να μεταδίδονται τουλάχιστον κάθε 10s για να επιτρέπουν στα νεοεισερχόμενα στο δίκτυο τερματικά να λαμβάνουν τις απαραίτητες πληροφορίες για την κατάσταση εκκίνησης. Επιπλέον, το μήνυμα TIM πρέπει να ανανεώνεται όποτε αυτό απαιτείται ώστε να αντανακλά τις μεταβολές στην κατάσταση του συστήματος που απαιτούν άμεση ενημέρωση των RCSTs.

Το ΤΒΤΡ πρέπει να ανανεώνεται σε κάθε υπερπλαίσιο, ενώ το μήνυμα unicast ΤΙΜ πρέπει να ανανεώνεται όποτε είναι αναγκαίο για να αντανακλά τις μεταβολές που επηρεάζουν το δεδομένο τερματικό.

Η παφαπάνω σηματοδοσία χρησιμοποιείται από το NCC για την επίτευξη του συγχρονισμού των RCST. Η διαδικασία συγχρονισμού αποτελείται από ένα σύνολο μηνυμάτων σηματοδοσίας που ανταλλάσσονται ανάμεσα στο NCC και τα τερματικά RCST σε κρατημένες χρονοσχισμές που επιτρέπουν το συντονισμό όλων των παραμέτρων συγχρονισμού. Τα μηνύματα που περιγράφονται στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση του συγχρονισμού των τερματικών. Οι καταιγισμοί ACQ και SYNC είναι ειδικοί καταιγισμοί που περιέχουν σύμβολα τα οποία χρησιμοποιούνται από το NCC για τη μέτρηση της συχνότητας και την έναρξη του χρόνου εκπομπής για κάθε RCST. Το NCC ζητεί από ένα τερματικό να μεταδώσει μια σειρά από καταιγισμούς ACQ μέσω του TIM εκχωρώντας μια χρονοσχισμή ACQ στο TBTP για περιορισμένο αριθμό επαναλήψεων. Σε συστήματα που μπορούν να διαθέσουν το απαιτούμενο εύρος ζώνης για συγχρονισμό, το NCC ζητεί από κάθε RCST να μεταδώσει ένα καταιγισμό ACQ, όπως και όποτε απαιτείται, δίδοντας σήμα για την εκχώρηση ενος καταιγισμού ACQ μέσω του TBTP.

Επίσης σε συστήματα που χρησιμοποιούν περιοδικές μεταδόσεις καταιγισμών SYNC, το NCC ζητεί από ενα RCST να μεταδίδει περιοδικά καταιγισμούς SYNC μέσω του μηνύματος TIM εκχωρώντας μια χρονοσχισμή SYNC κάθε N υπερπλαίσια. Το NCC προσδιορίζει το σφάλμα ισχύος, συχνότητας και χρόνου εκπομπής του καταιγισμού για το RCST. Οι διορθώσεις για τη συχνότητα και το χρόνο εκπομπής ενός καταιγισμού αποστέλλονται στο RCST σε ένα πίνακα CMT.

66

Κεφάλαιο 3

Δυναμική Κατανομή των πό<u>ξ</u>ων σε Δο<u>ξ</u>υφο<u>ξ</u>ικά Δίκτυα Επικοινωνιών

3.1 Εισαγωγή-Επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας

3.1.1 Δυναμική κατανομή των πόρων-Ορισμός του προβλήματος

Τα τελευταία χρόνια τα δορυφορικά δίκτυα ευρείας ζώνης έχουν αποκτήσει σημαντική θέση στην παγκόσμια τηλεπικοινωνιακή υποδομή λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν έναντι των άλλων τύπων δικτύων. Τα σημαντικότερα μεταξύ αυτών είναι η ευρεία κάλυψη, η ευελιξία στον ανασχεδιασμό και η δυνατότητα παροχής ευρυζωνικών υπηρεσιών IP σε απομακρυσμένες περιοχές [13].

Στα δοφυφοφικά δίκτυα επικοινωνιών η συνολική χωφητικότητα και ισχύς αποτελούν τους δεδομένους πόφους του συστήματος. Για την αποδοτική λειτουφγία του δικτύου απαιτείται η βέλτιστη χφησιμοποίηση των πόφων, συγκεκφιμένα η δίκαιη κατανομή τους σε ένα αφιθμό χφηστών με καθοφισμένες απαιτήσεις QoS οι οποίοι κάνουν αιτήσεις για να εξυπηφετηθούν από το δίκτυο. Έτσι, ένα κατάλληλο σχήμα κατανομής πόφων που εξασφαλίζει την αποδοτική κατανομή του δοφυφοφικού φάσματος υπό συγκεκφιμένες απαιτήσεις ποιότητας υπηφεσίας των χφηστών είναι καθοφιστικής σημασίας στα δοφυφοφικά δίκτυα.

Οι ιδιαίτεφες συνθήκες που επικφατούν στα δοφυφοφικά δίκτυα δίνουν μια διαφοφετική διάσταση στο πφόβλημα της διαχείφισης των πόφων. Εκτός από τις μεταβολές στην τηλεπικοινωνιακή κίνηση των σύγχφονων ευφυζωνικών υπηφεσιών, τα δοφυφοφικά δίκτυα έχουν να αντιμετωπίσουν τη μεγάλη καθυστέφηση διάδοσης και τις μεταβλητές συνθήκες που επικφατούν στο δοφυφοφικό δίαυλο. Το τελευταίο οφείλεται στο γεγονός ότι για την παφοχή υψηλών φυθμών μετάδοσης, τα σύγχφονα δοφυφοφικά δίκτυα λειτουφγούν στις ζώνες συχνοτήτων Ku (12/14GHz),

Ka (20/30GHz) και άνω, όπου n απόσβεση λόγω βροχής αποτελεί τον κύριο παράγοντα μείωσης της απόδοσης των ζεύξεων [14]. Συνεπώς, κατά τη σχεδίαση αποτελεσματικών σχημάτων κατανομής των πόρων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι χωρικές και χρονικές μεταβολές της απόσβεσης λόγω βροχής. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται τεχνικές καταπολέμησης των διαλείψεων (Fade Mitigation Techniques, FMT) για τη δυναμική αντιμετώπιση των διαλείψεων του διαύλου και την αποτελεσματική σχεδίαση σχημάτων κατανομής των πόρων, οδηγώντας έτσι σε σχήματα δυναμικής κατανομής των πόρων (Dynamic Bandwidth Allocation, DBA).

Συνεπώς, αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και εξασφάλιση ποιότητας υπηρεσίας είναι δύο αντικρουόμενοι στόχοι που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι αλγόριθμοι κατανομής των πόρων στα δορυφορικά δίκτυα επικοινωνιών. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια σειρά αλγορίθμων για την επίλυση του προβλήματος της κατανομής του δορυφορικού εύρους ζώνης σε διάφορους χρήστες και διαφορετικά είδη κίνησης εξασφαλίζοντας τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Συντονισμένες διαδικασίες μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων του δικτύου -από το φυσικό στρώμα μέχρι το στρώμα εφαρμογής - φαίνεται ότι αποτελούν την καλύτερη λύση για την αντιμετώπιση της μεταβλητότητας του δορυφορικού δικτύου. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή είναι πολύπλοκη και δύσκολο να επιτευχθεί διότι απαιτεί πολυάριθμες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων με στόχο τον έλεγχο του δικτύου και την ανταλλαγή πληροφοριών σηματοδοσίας. Οι βέλτιστες τεχνικές κατανομής πόρων στα δορυφορικά δίκτυα πρέπει να συντονίζουν ενέργειες στο φυσικό στρώμα (όπου εφαρμόζονται τα αντίμετρα κατά των διαλείψεων (Fade Counter-Measures, FCM) με ενέργειες στο στρώμα ζεύξης δεδομένων (όπου κατανέμεται το εύρος ζώνης) και το στρώμα εφαρμογής (όπου τίθενται οι απαιτήσεις QoS). Η δυσκολία της διαδικασίας αυτής έγκειται στις ταχέως μεταβαλλόμενες μετρήσεις που απαιτείται να πραγματοποιηθούν στο φυσικό στρώμα, για να μετρήσουν τις ταχέως μεταβαλλόμενες συνθήκες του διαύλου, που οδηγούν σε μη ευσταθή εκχώρηση των πόρων στο στρώμα ζεύξης δεδομένων. Επομένως, για την επίτευξη ευσταθών εκχωρήσεων στο στρώμα ζέυξης δεδομένων απαιτείται πληροφορίας ανάδρασης.

Όπως προαναφέρθηκε, τα πρότυπα δορυφορικών δικτύων είναι απαραίτητα για να εξασφαλίσουν την βελτιστη λειτουργία των συστημάτων αυτών καθώς και τη διαλειτουργικότητα με τα επίγεια δίκτυα. Για το λόγο αυτό, έχει ορισθεί ένα πρότυπο για την ανοδική ζεύξη των δορυφορικών δικτύων από το ETSI, το πρότυπο DVB-RCS που χρησιμοποιείται ευρέως για μεταδόσεις

69

ΑΤΜ και MPEG πακέτων [11]. Στο πρότυπο DVB-RCS τα RCST πραγματοποιούν αιτήσεις για εύρος ζώνης στο κέντρο ελέγχου NCC μέσω αιτημάτων εύρους ζώνης. Έτσι, το πρότυπο θέτει ένα γενικό πλαίσιο για το σχεδιασμό σχημάτων δυναμικής κατανομής των πόρων και εκχώρησης εύρους ζώνης ανάλογα με τη ζήτηση BoD. Αυτό το επιτυγχάνει ορίζοντας τις κατηγορίες αιτημάτων εύρους ζώνης, από αυτό με τη μεγαλύτερη προς αυτό με τη μικρότερη προτεραιότητα: CRA, RBDC και VBDC. Η κατηγορία FCA συνήθως δεν λαμβάνεται υπόψη από τα σχήματα δυναμικής κατανομής των πόρων διότι δεν γίνεται αίτηση για αυτή από τα RCST στο κέντρο ελέγχου NCC. Οι αιτήσεις των RCST σε μία δέσμη αποτελούν τα δεδομένα στο πρόβλημα κατανομής των πόρων. Για ανανέωση της κατανομής το NCC αποστέλλει τον πίνακα TBTP στην αρχή κάθε υπερπλαισίου. Σε κάθε περίπτωση, το πρότυπο δεν θέτει αυστηρούς περιορισμούς στους αλγορίθμους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κατανομή των πόρων και, συνεπώς, έχουν αναπτυχθεί πολλοί αλγόριθμοι επίλυσης του προβλήματος.

3.1.2 Δυναμικοί Αλγόριθμοι Κατανομής των πόρων

Οι δυναμικοί αλγόριθμοι κατανομής των πόρων διακρίνονται σε στατικούς και προσαρμοστικούς [15]:

Στατικοί Αλγόριθμοι

Στους στατικούς αλγορίθμους κατανομής των πόρων, από τη στιγμή που εκχωρείται σε κάποιο τερματικό ένα συγκεκριμένο εύρος ζώνης, αυτό παραμένει σταθερό για όλη τη διάρκεια της σύνδεσης. Στη συνέχεια, το τερματικό RCST μπορεί τοπικά να διαχειρισθεί το εκχωρηθέν εύρος ζώνης και να το κατανείμει ανάμεσα σε κίνηση υψηλής και χαμηλής προτεραιότητας χωρίς το NCC να υπεισέρχεται στη διαδικασία.

Στην εργασία [16], γίνεται η υπόθεση ότι καμία μέτρηση πραγματικού χρόνου της κατάστασης του διαύλου δεν είναι διαθέσιμη στο σταθμό ελέγχου εκτός από δυαδική πληροφορία ως προς την κατάσταση του RCST που δηλώνει αν είναι υπο συνθήκες καθαρού ουρανού ή υπό συνθήκες διαλείψεων. Επομένως, λαμβάνονται υπόψη πληροφορίες 'a priori' που αφορούν τη μακροπρόθεσιμη χωροχρονική στατιστική (long term statistics) της απόσβεσης λόγω βροχής και εκτιμώνται με βάση τη γεωγραφική θέση του τερματικού. Το επίπεδο απόσβεσης που υπερβαίνεται για ένα δεδομένο ποσοστό του χρόνου προκύπτει από τον τύπο παρεμβολής (interpolation formula) του

τμήματος τηλεπικοινωνιών της ITU (ITU Radiocommunication Sector, ITU-R).

Ένας ακόμα στατικός αλγόριθμος κατανομής των πόρων προτείνεται από την εργασία [17], όπου χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο Μαρκοβιανό μοντέλο προσδιορίζεται η χειρότερη αναμενόμενη κατάσταση του διαύλου. Συνεπώς, οι πόροι που εκχωρούνται αντιστοιχούν στην περίπτωση των χειρότερων συνθηκών του διαύλου και παραμένουν σταθεροί κατά τη διάρκεια σύνδεσης ενός RCST.

Προσαρμοστικοί Αλγόριθμοι

Στους προσαρμοστικούς αλγορίθμους κατανομής των πόρων, κάθε τερματικό RCST μπορεί να αποστέλλει μηνύματα στο κέντρο ελέγχου NCC για να κάνει κράτηση ή να απελευθερώσει εύρος ζώνης με βάση τη δυναμική εκτίμηση των αναγκών του σε εύρος ζώνης. Για την ικανοποίηση των απαιτήσεων QoS της κίνησης που είναι ευαίσθητη στην καθυστέρηση, ένα τερματικό RCST μπορεί να ακολουθήσει τρεις προσεγγίσεις:

- Σταθερή εκχώρηση ανάλογα με το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης που ζητείται ανά σύνδεση
- Σταθερή εκχώρηση για δεδομένο ρυθμό μετάδοσης και δυναμική κατανομή για καταιγισμούς
 με ρυθμό μετάδοσης υψηλότερο από αυτόν που έχει ήδη εκχωρηθεί
- Τεχνικές πλήθως δυναμικής κατανομής των πόθων.

Η πρώτη προσέγγιση είναι αναποτελεσματική για δορυφορικά συστήματα καθώς το εύρος ζώνης εκχωρείται χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις πραγματικές ανάγκες των τερματικών. Οι τεχνικές πλήρως δυναμικής κατανομής εκμεταλλεύονται αποτελεσματικά τους πόρους του συστήματος καθώς δεν εκχωρείται εύρος ζώνης σε μη ενεργές περιόδους. Ωστόσο, το φορτίο για την ανταλλαγή μηνυμάτων σηματοδοσίας μπορεί να είναι πολύ μεγάλο κατά τη διάρκεια ταχειών μεταβολών της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, προκαλώντας μεγάλες καθυστερήσεις. Κατά συνέπεια, μια μεικτή στρατηγική φαίνεται ως η πλέον ευέλικτη επιλογή κατά την οποία σε κάθε τερματικό RCST εκχωρείται συγκεκριμένη χωρητικότητα, ενώ ένα πλήθος καναλιών εκχωρείται δυναμικά όταν απαιτείται υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης από αυτόν που έχει ήδη εκχωρηθεί.

Όσον αφορά τα προσαρμοστικά σχήματα, ένα από τα προβλήματα εφαρμογής τους στα δορυφορικά δίκτυα είναι η μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης που έχει ως συνέπεια τη μεγάλη χρονική καθυστέρηση από τη στιγμή που το τερματικό κάνει μια αίτηση για εκχώρηση πόρων
μέχρι τη στιγμή που ενημερώνεται για το εύρος ζώνης που του έχει εκχωρηθεί. Η καθυστέρηση αυτή ενδεχομένως καθιστά τους πόρους που ζητούν οι χρήστες κατά τη στιγμή της αίτησης διαφορετικούς από αυτούς που πραγματικά απαιτούνται τη στιγμή της εκχώρησης.

Τα προσαρμοστικά σχήματα κατηγοριοποιούνται σε σχήματα που αντιδρούν στις μεταβολές (reactive) και σε σχήματα που προβλέπουν τις μεταβολές (proactive). Τα σχήματα που αντιδρούν στις μεταβολές λαμβάνουν υπόψη το μέγεθος των ουρών, την απώλεια πακέτων και τη μέση καθυστέρηση τη χρονική στιγμή της αίτησης για να αντιδράσουν στις μεταβολές της κίνησης, χωρίς να προσπαθήσουν να προβλέψουν τις μεταβολές αυτές. Σε σύγκριση με τους αλγορίθμους πρόβλεψης, οι αλγόριθμοι που αντιδρούν στις μεταβολές υλοποιούνται ευκολότερα και μπορούν να καταστήσουν αποδοτικότερη τη χρήση της χωρητικότητας του διαύλου. Ωστόσο, οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών δεν ικανοποιούνται πάντα, διότι οι αιτήσεις που φθάνουν στο κέντρο ελέγχου δεν αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης τη δεδομένη χρονική στιγμή. Παράδειγμα αλγορίθμου της κατηγορίας αυτής αποτελούν τα σχήματα πολλαπλής πρόσβασης με κράτηση πακέτου (Packet Reservation Multiple Access, PRMA) σε δορυφορικά συστήματα LEO, όπου οι χρονοσχισμές εκχωρούνται στους χρήστες ανάλογα με τη ζήτηση. Στην εργασία [18], οι συγγραφείς προτείνουν ένα σχήμα κατανομής των πόρων που απελευθερώνει το εύρος ζώνης που έχει εκχωρηθεί σε συνδέσεις όταν έχει μικρές πιθανότητες να χρησιμοποιηθεί σε ορίζοντα k=2 κελιών. Τα σχήματα που αντιδρούν στις μεταβολές παρουσιάζουν καλή επίδοση σε δοουφορικά δίκτυα LEO, αλλά δεν προσαρμόζονται καλά στις περίπτωση γεωστατικών δορυφόρων λόγω της μεγάλης καθυστέρησης διάδοσης.

Τα σχήματα που προβλέπουν τις μεταβολές αποσκοπούν στην ανάλυση της κίνησης και την πρόβλεψη του απαιτούμενου εύρους ζώνης. Αυτό συνήθως πραγματοποιείται παρέχοντας τα δεδομένα (π.χ. μήκος των ουρών, ροές εισόδου και εξόδου) μέχρι τη χρονική στιγμή τ και το σχήμα πραγματοποιεί πρόβλεψη της κίνησης για το χρονικό διάστημα [t, t+k) (πχ.η κίνηση στο επόμενο υπερπλαίσιο), με βάση τις στατιστικές ιδιότητες της κίνησης. Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται εκτίμηση του απαιτούμενου εύρους ζώνης. Η επίδοση των σχημάτων αυτών εξαρτάται από την ακρίβεια της πρόβλεψης της απαιτούμενης κίνησης.

Μια σειφά σχημάτων πφόβλεψης της κίνησης έχει προταθεί στη βιβλιογραφία [19]-[31]. Στις εργασίες [19]-[20] χρησιμοποιείται η θεωρία της αυτοομοιότητας (Self-Similarity, SS) για τη μοντελοποίηση της κίνησης των δεδομένων διαδικτύου. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, μια αίτηση τύπου RBDC από κάθε τεθματικό, σύμφωνα με τα προβλεπόμενα από το πρότυπο DVB-RCS, αντιστοιχεί στο προβλεπόμενο φορτίο κίνησης και ταυτοχρόνως εισάγεται ένας διορθωτικός παράγοντας ζ_n που αντιστοιχεί στην ανακρίβεια της πρόβλεψης. Ο παράγοντας αυτός εισάγεται για να μην υπάρξει υποεκτίμηση και το σχήμα κατανομής των πόρων να επιτύχει καλύτερα αποτελέσματα ως προς την καθυστέρηση και την αξιοποίηση του εύρους ζώνης. Η θεωρία της αυτοομοιότητας για την μοντελοποίηση της κίνησης διαδικτύου υιοθετείται και στο προβλεπτικό σχήμα πολλαπλής πρόσβασης ανάλογα με τη ζήτηση (PRedictive Demand Assignment Multiple Access, PRDAMA) που προτείνεται στην αναφορά [21]. Στο σχήμα αυτό, με χρήση της μεθόδου τοπικής γραμμικής προσέγγισης (Local Linear Approximation, LLA) γίνεται εκτίμηση της θετικής τάσης της κίνησης διαδικτύου. Στις εργασίες [22]-[23], ο συγγραφέας προτείνει ένα προβλεπτικό σχήμα πρόσβασης και κράτησης πόρων (Predictive Resource Reservation Access, PRRA) που στηρίζεται σε πρόβλεψη της κίνησης videο διάσκεψης (videoconferencing). Σύμφωνα με τις εργασίες αυτές, η κατανομή που μοντελοποιεί καλύτερα αυτό το είδος κίνησης είναι η κατανομή Pearson V ή η αντεστραμένη κατανομή γάμμα.

Στα σχήματα που προβλέπουν τις μεταβολές ανήκουν και οι αλγόριθμοι της κατηγορίας συνδυασμένης ελεύθερης πολλαπλής πρόσβασης και πρόσβασης ανάλογα με τη ζήτηση (Combined Free and Demand Assignment Multiple Access, CF-DAMA) [24]. Στην εργασία [25] οι συγγραφείς παρουσιάζουν ένα πρωτόκολλο κατανομής των πόρων και αποφυγής συνωστισμού το οποίο εξασφαλίζει δίκαιη και αποτελεσματική κατανομή των πόρων ανάμεσα στα διάφορα είδη κίνησης. Στο σχήμα αυτό χρησιμοποιούνται οι αιτήσεις CRA, RBDC, VBDC και FCA σε κατάλληλους συνδυασμούς για τη μοντελοποίηση όλων των τύπων κίνησης. Ο αλγόριθμος στηρίζεται στη μείωση της ροής της κίνησης που εισέρχεται στο δίκτυο με κατάλληλη προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης. Αυτό πραγματοποιείται με συνεχείς μετρήσεις του ρυθμού αφίξεων και του διαθέσιμου εύρους ζώνης σε τακτά χρονικά διαστήματα, για τον προσδιορισμό του τελικού ρυθμού μετάδοσης που εξασφαλίζει δικαιοσύνη στην κατανομή των πόρων.

Στις εργασίες [26]-[29] οι συγγραφείς προτείνουν ένα αλγόριθμο δυναμικής κατανομής των πόρων που χρησιμοποιεί κατανεμημένη προβλεπτική προσέγγιση ελέγχου. Κάθε τερματικό RCST χρησιμοποιεί ένα τοπικό (κατανεμημένο) προσαρμοστικό σύστημα πρόβλεψης για τον προσδιορισμό της αναμενόμενης ροής κίνησης και πραγματοποιεί τις κατάλληλες αιτήσεις για εύρος ζώνης. Το τοπικό σύστημα πρόβλεψης λαμβάνει υπόψη του την πρόβλεψη της κίνησης και τα

πραγματικά μεγέθη των ουρών για τον προσδιορισμό της αίτησης για εύρος ζώνης. Μετά τη συλλογή όλων των αιτήσεων, το κέντρο ελέγχου κατανέμει τους πόρους εφαρμόζοντας αναλογική στρατηγική εκχώρησης. Στην αναφορά [30], ο ανωτέρω δυναμικός αλγόριθμος συγκρίνεται με ένα αλγόριθμο που αντιδρά στις μεταβολές και πραγματοποιεί αιτήσεις στο τέλος κάθε πλαισίου ανάλογα με το μήκος των ουρών κίνησης εκείνη τη χρονική στιγμή. Η σύγκριση αναδεικνύει την αποτελεσματικότητα του πρώτου αλγορίθμου υπό διάφορα φορτία κίνησης και συνθήκες διαύλου.

Μέθοδοι διαχείφισης της κίνησης πραγματικού χρόνου και μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης (real time-VBR) με στόχο την αντιμετώπιση της σπατάλης εύρους ζώνης που προκαλεί η μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης στα δορυφορικά δίκτυα μελετώνται στην αναφορά [31]. Στην εργασία [31] το προτεινόμενο σχήμα διαχειρίζεται την κίνηση αυτου του τύπου με ημιμόνιμη (semipermanent) και όχι σταθερή εκχώρηση εύρους ζώνης ακριβώς όπως τα σχήματα κατανομής των πόρων διαχειρίζεται την κίνηση αυτου του τύπου με ημιμόνιμη (semipermanent) και όχι σταθερή εκχώρηση εύρους ζώνης ακριβώς όπως τα σχήματα κατανομής των πόρων διαχειρίζονται την κίνηση μη πραγματικού χρόνου. Η τεχνική αυτή σε συνδυασμό με τη σηματοδοσία εντός ζώνης (in-band signaling) και την τεχνική παράτασης της κράτησης των πόρων (resources engagement prolongation) διευκολύνει την αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης. Συγκεκριμένα, η αίτηση για ένα καινούριο καταιγισμό ενός ήδη ενεργού τερματικού γίνεται στην επικεφαλίδα των πακέτων του προηγούμενου καταιγισμού που αυτό μεταδίδει. Όταν το κέντρο ελέγχου διαπιστώσει ότι οι πόροι που ζητεί το τερματικό είναι ήδη δεσμευμένοι από προηγούμενη κίνηση του ίδιου, παρατείνει απλώς τη δέσμευση των πόρων αυτών. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η σηματοδοσία και η άσκοπη σπατάλη εύρους ζώνης κατά την υποβολή των αιτήσεων.

Τέλος, στις εργασίες [32], [33] παρουσιάζονται προβλεπτικοί αλγόριθμοι κατανομής των πόρων για κίνηση VoIP σε δορυφορικά δίκτυα DVB-RCS.

3.1.3 Δυναμική κατανομή των πόρων ως πρόβλημα βελτιστοποίη-

σης

Διάφορα σχήματα έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για την αντιμετώπιση του προβλήματος κατανομής των πόρων ως πρόβλημα βελτιστοποίησης της οργάνωσης των υπερπλαισίων και πλαισίων MF-TDMA ενός DVB-RCS δορυφορικού συστήματος. Στις εργασίες [34], [35] παρουσιάζεται μια μέθοδος για βέλτιστη σχεδίαση της δομής του υπερπλαισίου με κριτήριο τη μεγιστοποίηση της διέλευσης (throughput) του δικτύου. Οι συγγραφείς μοντελοποιούν το πρόβλημα ως μη γραμμικό συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης στην εργασία [34] και ως δυαδικό πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού (binary integer programming, BIP) στην εργασία [35]. Ωστόσο, η προτεινόμενη μέθοδος θεωρεί σταθερό μέγεθος πλαισίων και υπερπλαισίων και δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σε περιπτώσεις όπου λαμβάνεται υπόψη ο φυσικός δίαυλος όπου η χρήση προσαρμοστικού μεγέθους πλαισίων αποτελεί την καταλληλότερη επιλογή.

Στην εργασία [36] η ανωτέρω ανάλυση επεκτείνεται στην περίπτωση ετερογενών χρηστών λαμβάνοντας υπόψη το φυσικό δίαυλο και διαχωρίζοντας τους χρήστες σε αυτούς που βρίσκονται υπό συνθήκες διαλείψεων και σε αυτούς που βρίσκονται υπό συνθήκες καθαρού ουρανού. Επειδή οι δύο κατηγορίες χρηστών χρησιμοποιούν διαφορετικούς ρυθμούς κωδικοποίησης και μετάδοσης συμβόλων πραγματοποιείται διαχωρισμός και στα φέροντα που μπορούν να χρησιμοποιήσουν. Το πρόβλημα και πάλι μοντελοποιείται ως ένα μη γραμμικό συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης και επιλύεται με τη χρήση ενός κατάλληλου ευριστικού αλγορίθμου. Ωστόσο, και στο σχήμα αυτό η διάρκεια των χρονοσχισμών στα δύο είδη φερόντων είναι σταθερή ανά κατηγορία, με συνέπεια το σχήμα να στερείται προσαρμοστικότητας στις μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Στην αναφορά [37], το πρόβλημα που περιγράφεται στην αναφορά [35] μοντελοποιείται ώστε ένα τερματικό να έχει κέρδος μετάδοσης μόνο όταν του εκχωρηθούν όλες οι απαιτούμενες χρονοσχισμές για τη μετάδοση ενός πακέτου. Τρεις ευριστικοί αλγόριθμοι πραγματικού χρόνου προτείνονται για την επίλυση του προβλήματος που διαφοροποιούνται ως προς την προτεραιότητα που αποδίδουν στη μετάδοση των πακέτων (μέγεθος πακέτου, κέρδος μετάδοσης πακέτου, λόγος κέρδους μετάδοσης προς μέγεθος πακέτου). Αποδεικνύεται ότι η επίδοση των αλγορίθμων είναι βελτιωμένη σε σύγκριση με συτόν που προτείνεται στην αναφορά [35]. Τέλος, στην εργασία [38] το πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει ως στόχο τον προσδιορισμό του μήκους υπερπλαισίου υπό διάφορα φορτία κίνησης. Στόχος του αλγορίθμου είναι η μείωση του μήκους του υπερπλαισίου για τη μείωση του χρόνου αναμονής της οργάνωσης του υπερπλαισίου όπως και την επίτευξη υψηλής χρησιμοποίησης των πόρων.

Στο ίδιο πλαίσιο, αλγόριθμοι που μοντελοποιούν το πρόβλημα κατανομής των πόρων ως πρόβλημα βελτιστοποίησης παρουσιάζονται στις εργασίες [39]-[42], όπου δίδεται έμφαση στη δίκαιη κατανομή των πόρων στους χρήστες. Το πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα κυρτό πρό-βλημα βελτιστοποίησης (convex optimization problem) και προβλέπεται μια ελάχιστη εκχώρηση

ανά χρήστη. Στις εργασίες [41] και [42] αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης της οργάνωσης των υπερπλαισίων και πλαισίων MF-TDMA κατά το οποίο τα φέροντα χωρίζονται σε περιοχές ανάλογα με τις συνθήκες του διαύλου των χρηστών υπό σταθερή διάρκεια χρονοσχισμών σε όλες τις περιοχές. Το πρόβλημα επιλύεται με συνδυασμένη χρήση της μεθόδου Lagrange και ενός ευριστικού αλγορίθμου που υπολογίζει τον αριθμό των χρονοσχισμών ανά περιοχή. Οι συνθήκες του διαύλου λαμβάνονται υπόψη μεταβάλλοντας το ρυθμό κώδικα και επομένως τον αριθμό των κελιών ΑΤΜ που μεταδίδονται ανά χρονοσχισμή. Το γενικό πρόβλημα κατανομής των πόρων στους χρήστες με προτεραιότητες προβλέποντας, ταυτόχρονα, μια ελάχιστη εκχώρηση ανά χρήστη επιλύεται στις εργασίες [43]-[44]. Στην εργασία [43] παρουσιάζεται η βέλτιστη λύση με χρήση της μεθόδου Lagrange και προτείνεται ένας αλγόριθμος χαμηλού υπολογιστικού κόστους που υπολογίζει την ακριβή λύση του προβλήματος εντός λογικού χρόνου ακόμα και σε δίκτυα με μεγάλο αριθμό χρηστών. Στην εργασία [44], προτείνεται ένας συνδυαστικός αλγόριθμος που χρησιμοποιεί γνωστές τεχνικές διάσπασης (decomposition methods), τη δυαδική (dual) και την αρχέγονη (primal) μέθοδο, με διαστρωματικό τρόπο για την εύρεση της βέλτιστης λύσης με μεγάλη ταχύτητα σύγκλισης και μικρότερο υπολογιστικό κόστος σε σύγκριση με τη χρησιμοποίηση κάποιας από τις προαναφερθείσες μεθόδους μόνης της και όχι σε συνδυασμό με κάποια άλλη.

Επίλυση του προβλήματος κατανομής των πόρων με χρήση της θεωρίας παιγνίων παρουσιάζεται στις εργασίες [45]-[46]. Στην εργασία [45] η κατανομή των πόρων σε δίκτυα υψηλών ταχυτήτων επιλύεται ως πρόβλημα διαπραγμάτευσης Nash με χρήση της συνεργατικής θεωρίας παιγνίων. Ο προτεινόμενος κατανεμημένος αλγόριθμος επιτυγχάνει τη δίκαιη κατανομή των πόφων στους χρήστες με διατίμηση (pricing) με κριτήριο τη μεγιστοποίηση της συνολικής προσόδου του δικτύου. Κατανομή των πόρων σε δύο επίπεδα με χρήση της θεωρίας παιγνίων για δίκτυα DVB-RCS πολλαπλών δεσμών παρουσιάζεται στην εργασία [46]. Στο πρώτο επίπεδο το εύρος ζώνης μοιράζεται στις δέσμες, ενώ στο δεύτερο επίπεδο μια συνεργατική (cooperative) και μία μη συνεργατική μέθοδος (non-cooperative) προτείνονται για την εκχώρηση των πόρων στους χρήστες. Η επίδοση των μεθόδων συγκρίνεται υπό συνθήκες καθαρού ουρανού και υπό συνθήκες διαλείψεων.

Τέλος, αλγόριθμοι που μοντελοποιούν το πρόβλημα κατανομής της ισχύος σε δορυφορικά δίκτυα πολλαπλών δεσμών ως πρόβλημα βελτιστοποίησης προτείνονται στις εργασίες [47]-[49]. Στην εργασία [47], προτείνεται μια μέθοδος κατανομής της ισχύος που εγγυάται την ευστάθεια

του συστήματος βάσει του μήκους της ουράς και την κατάσταση του διαύλου, χωρίς γνώση του ρυθμού αφίξεων της κίνησης. Στην περίπτωση πολλαπλών δορυφόρων με πολλές ουρές ο καθένας για την κίνηση καθοδικής ζεύξης, λαμβάνεται απόφαση δρομολόγησης για τη μεγιστοποίηση της συνολικής διέλευσης του συστήματος. Στην εργασία [48] παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος για τη βέλτιστη κατανομή της ισχύος σε δορυφορικά δίκτυα πολλαπλών δεσμών βάσει της κατανομής της κίνησης με στόχο της μεγιστοποίηση της διέλευσης του συστήματος και την επίτευξη δικαιοσύνης ανάμεσα στους χρήστες. Το πρόβλημα επιλύεται με χρήση της μεθόδου Lagrange. Στο ίδιο πλαίσιο, στην εργασία [49] το πρόβλημα μελετάται υπό συνθήκες διαλείψεων.

3.1.4 Δυναμική κατανομή των πόρων με διαστρωματική προσέγγιση

Όπως προαναφέρθηκε, για την παροχή υψηλών ρυθμών μετάδοσης τα σύγχρονα δορυφορικά δίκτυα λειτουργούν στις ζώνες συχνοτήτων Ku (12/14GHz) και Ka (20/30GHz) και πάνω όπου η απόσβεση λόγω βροχής αποτελεί τον κύριο παράγοντα μείωσης της απόδοσης των ζεύξεων [14]. Συνεπώς, κατά τη σχεδίαση αποτελεσματικών σχημάτων κατανομής των πόρων πρέπει να ληφθούν υπόψη οι χωρικές και χρονικές μεταβολές της απόσβεσης λόγω βροχής και να χρησιμοποιηθούν διαστρωματικά σχήματα κατανομής των πόρων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι άμβλυνσης των διαλείψεων FMT για τη δυναμική αντιμετώπιση των διαλείψεων του διαύλου και την αποτελεσματική σχεδίαση σχημάτων κατανομής των πόρων.

Στο πλαίσιο αυτό, στις εργασίες [51]-[54] προτείνεται μια σειρά αλγορίθμων δυναμικής κατανομής των πόρων με διαστρωματική προσέγγιση, ενώ στις εργασίες [55]-[56] παρουσιάζεται επισκόπηση των αλγορίθμων δυναμικής κατανομής των πόρων με διαστρωματική προσέγγιση. Στις εργασίες [51], [52], πραγματοποιείται κατανομή των πόρων σε δύο επίπεδα και σε διαφορετικές κλιμακώσεις του χρόνου. Στο πρώτο επίπεδο το εύρος ζώνης κατανέμεται στα τερματικά RCSTs και στο δεύτερο επίπεδο το εύρος ζώνης που έχει εκχωρηθεί σε κάθε τερματικό κατανέμεται στα διάφορα είδη κίνησης. Δύο είδη κίνησης λαμβάνονται υπόψη κατά τη συγκεκριμένη προσέγγιση, κίνηση εγγυημένου εύρους ζώνης πραγματικού χρόνου σταθερού ρυθμού μετάδοσης (Guaranteed Bandwidth, GB) και κίνηση βέλτιστης προσπάθειας (Best Effort, BE). Η κίνηση πραγματικού χρόνου GB υπόκειται σε έλεγχο αποδοχής κλήσεων τοπικά από ελεγκτές που βρίσκονται τοποθετημένοι στα τερματικά RCSTs στα πλαίσια του εύρους ζώνης που τους έχει εκχωρηθεί στο πρώτο επίπεδο κατανομής των πόρων. Η κίνηση μη πραγματικού χρόνου μοντελοποιείται μέσω μοντέλου αυτοοργανούμενης κίνησης διακριτού χρόνου με σκοπό τον υπολογισμό της πιθανότητας απώλειας πακέτων. Το εύρος ζώνης που εκχωρείται στην κίνηση μη πραγματικού χρόνου είναι αυτό που παραμένει διαθέσιμο σε κάθε σταθμό μετά την εξυπηρέτηση της κίνησης πραγματικού χρόνου. Ανακατανομή των πόρων που εκχωρούνται στην κίνηση πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου πραγματοποιείται όταν συμβεί μεταβολή των συνθηκών του διαύλου του συγκεκριμένου τερματικού η οποία επιβάλλει μεταβολή των παραμέτρων μετάδοσης (ρυθμού μετάδοσης και ρυθμού κώδικα) διότι αυτή προκαλεί μεταβολή του πραγματικά διαθέσιμου εύρους ζώνης. Η διαστρωματική αλληλεπίδραση, επομένως, προέρχεται από την εφαρμογή μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης και ρυθμού κώδικα στο φυσικό στρώμα γεγονός που αντιστοιχεί σε μείωση του πραγματικού εύρους ζώνης. Όσον αφορά την κατανομή των πόρων στα τερματικά στο πρώτο επίπεδο από το κέντρο ελέγχο του δικτύου, προτείνονται και συγκρίνονται τρεις διαφορετικές μέθοδοι κατανομής των πόρων:

- ι. Διαστρωματική Βέλτιστη Κεντρικά ελεγχόμενη μέθοδος (Optimized Centralized, OC): Το εύρος ζώνης κατανέμεται από το κέντρο ελέγχου ύστερα από ζήτηση, ο οποίος επιλύει ένα κεντρικά ελεγχόμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης.
- u. Διαστρωματική Βέλτιστη κατανεμημένη μέθοδος (Optimized Proportional, OR): Βέλτιστες αιτήσεις κίνησης υπολογίζονται τοπικά στα τερματικά και αποστέλλονται στο κέντρο ελέγχου, το οποίο κατανέμει το εύρος ζώνης αντίστοιχα προς την αίτηση.
- ιι. Απλή αναλογική μέθοδος (Simple Proportional, SP): Το εύρος ζώνης που εκχωρείται είναι ανάλογο του φορτίου κίνησης χωρίς καμία δυναμική διαστρωματική μέθοδο εκχώρησης.

Το πλεονέκτημα που παρουσιάζουν οι διαστρωματικές τεχνικές είναι ότι θέτουν ως κριτήριο τη διατήρηση της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων (Call Blocking Probability) κάτω από ένα δεδομένο κατώφλι, εξασφαλίζοντας την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας απόρριψης κλήσεων (Call Dropping Probability) της κίνησης πραγματικού χρόνου και της πιθανότητας απώλειας πακέτων της κίνησης μη πραγματικού χρόνου.

Στις εργασίες [53], [54], προτείνεται ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης που ονομάζεται ανάλυση ευαισθησίας και μείωσης της μεταβολής και στηρίζεται στην ανάλυση απειροστών διαταραχών (Infinitesimal Perturbation Analysis, IPA). Η ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει τις μεταβολές των συνθηκών του διαύλου και του φορτίου κίνησης που συμβαίνουν σε ένα δοουφοοικό δίκτυο. Η μέθοδος εκτιμά την ευαισθησία στηριζόμενη μόνο σε διαύλους - δείγματα του συστήματος και δεν απαιτεί έκφραση κλειστής μορφής για το μέτρο επίδοσης. Φαίνεται ως πολλά υποσχόμενη τεχνική που μπορεί να αντιμετωπίζει τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας των δορυφορικών δικτύων και να αντιδρά σε οποιαδήποτε μεταβολή.

Στις εργασίες [57], [58], παρουσιάζεται ένα προσαρμοστικό σχήμα κατανομής και ελέγχου των πόρων (Adaptive Resource Allocation and Management, ARAM) που αποσκοπεί στην αποτελεσματική χρησιμοποίηση και δίκαιη κατανομή των πόρων στους χρήστες (μέσω της εισαγωγής προτεραιοτήτων) με τη μικρότερη δυνατή υποβάθμιση των απαιτήσεων QoS. Δύο είδη κίνησης λαμβάνονται υπόψη στη συγκεκριμένη προσέγγιση, κίνηση VBR και ABR. Η κίνηση VBR υπόκειται σε έλεγχο αποδοχής κλήσεων με κριτήριο ότι η πιθανότητα το άθροισμα των στιγμαίων ρυθμών μετάδοσης που διατίθενται στην κίνηση αυτή να μην υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο κατώφλιο. Ένας παράγοντας επέκτασης του εύρους ζώνης, η τιμή του οποίου μεταβάλλεται προσαρμοστικά με βάση μετρήσεις, χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση των επιδράσεων στατιστικής πολυπλεξίας της κίνησης VBR. Στο πλαίσιο αυτό παρουσιάζονται και συγκρίνονται δύο αλγόριθμοι κατανομής πόρων και αποδοχής κλήσεων, ένας στατικός και ένας προσαρμοστικός. Σύμφωνα με το στατικό αλγόριθμο, ο παράγοντας επέκτασης του εύρους ζώνης υπολογίζεται χωρίς να λαμβάνονται υπόψη στατιστικά στοιχεία της προηγούμενης κίνησης. Σύμφωνα με τον προσαρμοστικό αλγόριθμο, λαμβάνεται υπόψη η στατιστική πολυπλεξία των προηγούμενων καταιγισμών κίνησης για την καλύτερη εκτίμηση της μεταβολής της κίνησης. FEC και MPEG προσαρμοστικοί ρυθμοί κώδικα είναι άλλοι διορθωτικοί παράγοντες που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση των μεταβολών της κίνησης και των συνθηκών του διαύλου.

Στις εργασίες [59], [60], οι συγγραφείς προτείνουν δυναμικά σχήματα κατανομής των πόρων για δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων Κα. Τα σχήματα αυτά χρησιμοποιούν προσαρμοστική κωδικοποίηση και διαμόρφωση ACM ως αντίμετρα κατά των διαλείψεων, ενώ η σημαντικότερη συνεισφορά τους συνίσταται στην προσπάθεια εκτίμησης των συνθηκών του διαύλου ώστε να ρυθμίζονται δυναμικά οι παράμετροι μετάδοσης. Ουσιαστικά στόχος είναι η πρόβλεψη της κατανομής των χρηστών ανάμεσα στους διαφορετικούς συνδυασμούς ACM για χρονική διάρκεια λίγων min. Αυτό πραγματοποιείται με χρήση υπολογιστικών μοντέλων πρόβλεψης καιρού ή χωροχρονικών μοντέλων διαύλου [59] ή μέσω εκτίμησης του λόγου σήματος προς θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio, SNR) που στηρίζεται σε στατιστικά στοιχεία των

προηγούμενων καταιγισμών [60]. Καίτοι τα ανωτέρω σχήματα επιτυγχάνουν την προσαρμογή των παραμέτρων μετάδοσης στις συνθήκες του διαύλου, δεν παρέχουν ολοκληρωμένη ανάλυση του δορυφορικού διαύλου.

Τέλος, στο ίδιο πλαίσιο, στην εργασία [61] προτείνεται ένα διαστρωματικό σχήμα κατανομής των πόρων για δορυφορικά συστήματα πολλαπλών δεσμών που λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων Ka. Το προτεινόμενο σχήμα χρησιμοποιεί τη μοντελοποίηση του δορυφορικού διαύλου στη ζώνη συχνοτήτων Ka και χρησιμοποιεί ACM ως αντίμετρα κατά των διαλείψεων. Ο αλγόριθμος πραγματοποιεί διαχωρισμό των χρηστών που βρίσκονται υπό συνθήκες καθαρού ουρανού και αυτών υπό συνθήκες διαλείψεων που υπόκεινται σε ελαττωμένο ρυθμό μετάδοσης.

3.1.5 Κεντρικά ελεγχόμενοι και Κατανεμημένοι Αλγόριθμοι κατανομής των πόρων

Μια ακόμη κατηγοριοποίηση των αλγορίθμων κατανομής των πόρων γίνεται με κριτήριο την ύπαρξη ή όχι μιας κεντρικής οντότητας υπεύθυνης για τη κατανομή των πόρων του συστήματος στους χρήστες. Με βάση το κριτήριο αυτό οι αλγόριθμοι διακρίνονται σε κεντρικά ελεγχόμενους και σε κατανεμημένους. Στην περίπτωση των κεντρικά ελεγχόμενων αλγορίθμων, το κέντρο ελέγχου είναι υπεύθυνο για τη συλλογή των αιτήσεων και την εξασφάλιση ενός τμήματος των πόρων σε όλους τους σταθμούς που κάνουν αίτηση. Στην κεντρικά ελεγχόμενη περίπτωση, το κέντρο ελέγχου δημιουργεί το χρονοδιάγραμμα μετάδοσης TBTP και το αποστέλλει σε όλα τα τερματικά, ώστε να γνωρίζουν ποιες χρονοσχισμές τους έχουν εκχωρηθεί για μετάδοση. Αντίθετα, στην περίπτωση των κατανεμημένων αλγορίθμων, κάθε σταθμός λαμβάνει μόνος του τις αιτήσεις όλων των άλλων σταθμών. Σε όλα τα τερματικά τρέχει ο ίδιος αλγόριθμος που σχετίζεται με τον τρόπο χειρισμού των αιτήσεων και τη δημιουργία του πλάνου κατανομής. Κάθε σταθμός υπολογίζει μόνος του το TBTP και προγραμματίζει ανάλογα τις μεταδόσεις του. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται προσοχή στη συμφωνία των χρονοδιαγραμμάτων μετάδοσης που προσδιορίζεται από τα διάφορα τερματικά.

Το πλεονέκτημα που παρουσιάζουν οι κεντρικά ελεγχόμενοι αλγόριθμοι έναντι των κατανεμημένων είναι ότι μειώνουν το χρόνο μεταξύ αίτησης και εκχώρησης χωρητικότητας κατά ένα RTT (Round Trip Time). Στην κεντρικά ελεγχόμενη περίπτωση το κέντρο ελέγχου πρέπει να συγκεντρώσει όλες τις αιτήσεις, να υπολογίσει το χρονοδιάγραμμα κατανομής των πόρων και να το αποστείλει με ευθυεκπομπή σε όλους τους σταθμούς. Αυτό δημιουργεί μια καθυστέρηση τουλάχιστον δύο RTT μεταξύ αίτησης και εκχώρησης χωρητικότητας . Έτσι, στην περίπτωση ενός κεντρικά ελεγχόμενου σχήματος στο οποίο κάθε σταθμός πρέπει να προσαρμόσει τις παραμέτρους μετάδοσης στην ποιότητα της ζεύξης, το επίπεδο απόσβεσης πρέπει να προβλεφθεί για ένα διάστημα που εξαρτάται από το χρόνο μεταξύ αίτησης και εκχώρησης χωρητικότητας. Η ακρίβεια της πρόβλεψης αυτής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το χρόνο πρόβλεψης. Έτσι όσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση μεταξύ αίτησης και εκχώρησης χωρητικότητας τόσο μεγαλύτερο είναι και το περιθώριο διαλείψεων που πρέπει να ληφθεί υπόψη ώστε να μην υπάρξει υποεκτίμηση της απόσβεσης της ζεύξης.

Ωστόσο, ο κεντρικά ελεγχόμενος έλεγχος είναι πλέον εύφωστος από τον κατανεμημένο. Η απλούστερη υλοποίησή του και η μεγαλύτερη ευρωστία του αντισταθμίζουν τη μεγαλύτερη διάρκεια κατανομής των πόρων. Αυτό συμβαίνει γιατί κάθε σταθμός αρκεί να λάβει μόνο το σήμα από το κέντρο ελέγχου για να γνωρίζει πότε να μεταδώσει. Αντίθετα, στον κατανεμημένο έλεγχο κάθε σταθμός πρέπει να λάβει όλες τις αιτήσεις για να είναι σε θέση να δημιουργήσει σωστά το χρονοδιάγραμμα μετάδοσης ΤΒΤΡ. Ωστόσο, υπό συνθήκες διαλείψεων κάποιοι σταθμοί λαμβάνουν χαμηλότερα επίπεδα ισχύος λόγω κακών ατμοσφαιρικών συνθηκών, με αποτέλεσμα ορισμένα τερματικά να μην είναι σε θέση να λάβουν τις αιτήσεις των σταθμών που βρίσκονται υπό συνθήκες διαλείψεων. Στην περίπτωση αυτή, το ΤΒΤΡ δεν υπολογίζεται σωστά και οι σταθμοί μεταδίδουν με αυξημένη πιθανότητα συγκρούσεων, γεγονός που προκαλεί μείωση της διέλευσης του συστήματος. Για το λόγο αυτό, στους κατανεμημένους αλγορίθμους εξασφαλίζονται τρόποι ανάκαμψης από τις πιθανότητες απωλειών για να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία του συστήματος. Αυτό το γεγονός εξηγεί γιατί τα πρωτόκολλα κατανεμημένου ελέγχου είναι περισσότερο πολύπλοκα από τα αντίστοιχα κεντρικά ελεγχόμενα και απαιτούν περισσότερο πλεονασμό μετάδοσης (redundancy).

Στο πλαίσιο αυτό, στην εργασία [62] παρουσιάζεται ένα κεντρικά ελεγχόμενο σύστημα πρόσβασης στο δορυφορικό δίκτυο που ονομάζεται (Fifo Ordered Demand Assignment/Information Bit Energy Adaptive, FODA-IBEA), ενώ στις εργασίες [63], [64] μελετώνται δύο συστήματα με κατανεμημένο έλεγχο. Τα τρία σχήματα σχεδιάστηκαν για να ικανοποιούν συγκεκριμένες απαιτήσεις όπως: (i) ταυτόχρονη μετάδοση κίνησης πραγματικού και μη-πραγματικού χρόνου, (ii) διατήρηση της ποιότητας υπηρεσίας όσο το δυνατόν πλησιέστερα προς τις απαιτήσεις των χρηστών, (iii)

βελτιστοποίηση του διαύλου υπό όλες τις συνθήκες του διαύλου. Τα συστήματα υιοθετούν τεχνική αντιμέτρων κατά των διαλείψεων FCM σύμφωνα με την οποία η συνολική απόσβεση κάθε διαύλου αντισταθμίζεται μέσω του ελέγχου ισχύος άνω ζεύξης ULPC και τον προσαρμοστικό ρυθμό μετάδοσης και κώδικα. Για τη μείωση της καθυστέρησης μεταξύ αίτησης και εκχώρησης χωρητικότητας προτείνονται δύο κατανεμημένοι αλγόριθμοι. Για την εξασφάλιση αποδεκτής ευστάθειας στο σύστημα μελετώνται διαδικασίες ανάκαμιψης από απώλειες στις οποίες λαμβάνονται υπόψη οι πιθανότητες απώλειας καταιγισμών, οι πιθανότητες απώλειας αιτήσεων και οι πιθανότητες μη μετάδοσης. Τα τρία σχήματα συγκρίνονται στην εργασία [65] ως προς την καθυστέρηση μετάδοσης (end-to-end delay) για διαφορετικά είδη κίνησης και για μεταβαλλόμενο αριθμό χρηστών. Αποδεικνύεται ότι ο κεντρικά ελεγχόμενος αλγόριθμος παρουσιάζει σταθερή συμπεριφορά ανεξαρτήτως του αριθμού των χρηστών, ενώ οι κατανεμημένοι έχουν καλύτερη επίδοση για συγκεκριμένο εύρος τιμών του αριθμού των χρηστών ανάλογα με τη μέθοδο με την οποία χειρίζονται τον αυξανόμενο αριθμό των χρηστών ανά πλαίσιο.

3.2 Σύνοψη του Προτεινόμενου Αλγορίθμου

Στο συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται ένας νέος αποδοτικός αλγόριθμος δύο φάσεων με διαστρωματική προσέγγιση για τη δυναμική κατανομή των πόρων σε χρήστες της ζεύξης επιστροφής ενός δορυφορικού συστήματος DVB-RCS που υποστηρίζει κίνηση σταθερού ρυθμού μετάδοσης [66], [67]. Λόγω της εξάρτησης από διάφορους παράγοντες, το πρόβλημα κατανομής των πόρων διασπάται σε δύο διακριτά επιμέρους προβλήματα: τον υπολογισμό των πόρων και την εκχώρηση των πόρων. Στη φάση του υπολογισμού των πόρων, για τον υπολογισμό των χρονικών στιγμών κατά τις οποίες πρέπει να εκπεμφθεί ένα TBTP εισάγεται ένας αλγόριθμος πολλαπλών μερικών αθροισμάτων (multiple subset sum) μικρού υπολογιστικού κόστους. Καθώς στο πρότυπο DVB-RCS το TBTP πρέπει να ανανεώνεται στην αρχή κάθε υπερπλαισίου (Superframe, SF), τα υπερπλαίσια οργανώνονται δυναμικά με στόχο τη μεγιστοποίηση της διέλευσης του συστήματος. Αρχικά, η διαδικασία αυτή στηρίζεται σε ανάλυση του φυσικού στρώματος για την εκτίμηση του αναμενόμενου επιπέδου απόσβεσης και, στη συνέχεια, στη χρόση προσαρμοστικής κωδικοποίησης FEC για την αντιστάθμιση των διαλείψεων. Στη φάση της εκχώρησης των πόρων εισάγεται ένας υβριδικός αλγόριθμος τοποθέτησης σε δοχεία (Bin-packing) ο οποίος επιτυγχάνει τη μεγιστοποίηση της διέλευσης του συστήματος μέσω της ελαχιστοποίησης του τμήματος του πλαισίου που μένει αχρησιμοποίητο. Παρατίθενται αναλυτικές εκφράσεις εκτίμησης της επίδοσης του αλγορίθμου.

Στο προτεινόμενο σχήμα η διάρκεια του πλαισίου θεωρείται σταθερή και ίση με 26.5ms. Το υπερπλαίσιο αποτελείται από μεταβλητό αριθμό πλαισίων στη σειρά, με δομή που προσδιορίζεται δυναμικά μέσω του προτεινόμενου σχήματος. Επιπλέον, καθώς ο προτεινόμενος αλγόριθμος μελετά την επίδραση των δυναμικών χαρακτηριστικών της δορυφορικής ζεύξης στην κατανομή των πόρων, για λόγους απλούστευσης λαμβάνεται υπόψη η περίπτωση κίνησης CRA επειδή απαιτεί σταθερή χωρητικότητα ανά πλαίσιο. Οι αιτήσεις για εκχώρηση κίνησης πραγματοποιούνται με τη μέθοδο αιτήματος εντός ζώνης λόγω του μικρότερου φορτίου κίνησης και του πλεονεκτήματος ότι δεν επηρεάζεται από απώλειες λόγω σύγκρουσης πακέτων. Το προτεινόμενο σχήμα κατανομής πόρων σε δορυφορικά δίκτυα DVB-RCS περιλαμβάνει τρεις φάσεις:

ι. Υπολογισμός των πόρων (Αλγόριθμος από την πλευρά των τερματικών)

Τα τερματικά με βάση τις συνθήκες του δορυφορικού διαύλου σύμφωνα με τη μοντελοποίηση της απόσβεσης λόγω βροχής που παρατίθεται στο Παράρτημα Β, προσδιορίζουν τις απαιτήσεις τους ανά πλαίσιο καθώς και τις χρονικές στιγμές στις οποίες απαιτείται επαναπροσδιορισμός των παραμέτρων μετάδοσης ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις QoS.

u. Υπολογισμός των πόρων (Αλγόριθμος από την πλευρά του NCC)

Το NCC συγκεντρώνει τις αιτήσεις για εκχώρηση κίνησης από όλα τα τερματικά και αρχικά προσδιορίζει τις κατάλληλες χρονικές στιγμές για την αποστολή του TBTP, δηλαδή τις χρονικές στιγμές έναρξης των υπερπλαισίων. Στη συνέχεια προσδιορίζει το πλήθος των χρονοσχισμών που εκχωρούνται σε κάθε τερματικό RCST ανά πλαίσιο.

ιιι. Εκχώρηση των Πόρων

Το NCC εκχωρεί τις χρονοσχισμές στα αιτούντα τερματικά προσδιορίζοντας τη δομή του πλαισίου MF-TDMA. Η εκχώρηση πραγματοποιείται στην αρχή κάθε υπερπλαισίου όπως αυτή προσδιορίζεται στο προηγούμενο βήμα.

Ακολουθεί η ανάλυση του φυσικού στρώματος και η αναλυτική περιγραφή των τριών βημάτων του προτεινόμενου σχήματος.

3.3 Ανάλυση Φυσικού Στρώματος

Οι μεταβολές του δοουφορικού διαύλου που πορκαλούνται κυρίως από την απόσβεση λόγω βροχής πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά τη σχεδίαση ενός αποδοτικού αλγορίθμου κατανομής των πόρων. Για το λόγο αυτό, η τρέχουσα τάση στις διαστρωματικές (cross layer) προσεγγίσεις κατανομής των πόρων είναι η πρόβλεψη του αναμενόμενου επιπέδου απόσβεσης κατα τη διάρκεια μιας σύνδεσης. Στην εργασία [17] χρησιμοποιούνται αντίμετρα κατά των διαλείψεων με βάση τη χειρότερη αναμενόμενη κατάσταση του διαύλου, όπως αυτή προσδιορίζεται με χρήση κατάλληλου Μαρκοβιανού μοντέλου. Επομένως, οι πόροι που εκχωρούνται αντιστοιχούν στην περίπτωση των χειρότερων συνθηκών του διαύλου και παραμένουν σταθεροί κατά τη διάρκεια της σύνδεσης ενός τερματικού οδηγώντας σε σπατάλη εύρους ζώνης. Στην εργασία [60], η πρόβλεψη του σηματοθορυβικού λόγου SNR πραγματοποιείται μέσω εκτιμητή SNR που υπολογίζει το μέσο όρο των SNR πολλών καταιγισμών της ίδιας σύνδεσης. Στην εργασία [57] ο δορυφορικός δίαυλος μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας μια ημιμαρκοβιανή αλυσίδα με δύο καταστάσεις και για τη δυναμική αντιστάθμιση των μεταβολών των διαλείψεων επιλέγεται ο κατάλληλος ρυθμός κώδικα.

Στην εργασία [68] το αντίμετρο κατά των διαλείψεων που επιλέγεται αντισταθμίζει την απόσβεση άνω ζεύξης χρησιμοποιώντας Έλεγχο Ισχύος Άνω ζεύξης ULPC καθώς και τη συνολική απόσβεση- άνω και κάτω ζεύξης -μειώνοντας το ρυθμό μετάδοσης και το ρυθμό κώδικα που χρησιμοποιούνται. Συγκεκριμένα, ο σταθμός - συντονιστής εκτιμά την απόσβεση κάτω ζεύξης χρησιμοποιώντας ένα δέκτη σημάτων καθοδήγησης (beacon receiver) και τη συνολική απόσβεση χρησιμοποιώντας ένα δέκτη σημάτων καθοδήγησης (beacon receiver) και τη συνολική απόσβεση χρησιμοποιώντας ένα εκτιμητή περιβάλλουσας φέροντος στενής ζώνης. Στη συνέχεια, ένα πρωτότυπο modem σχεδιασμένο να ανταποκρίνεται κατάλληλα ανά καταιγισμό μεταβάλλει την ισχύ μετάδοσης, το ρυθμό μετάδοσης και το ρυθμό κώδικα. Επίσης, υπολογίζεται ένα κατάλληλο περιθώριο λόγω σφαλμάτων πρόβλεψης.

Στον προτεινόμενο αλγόριθμο, λαμβάνεται υπόψη μια δυναμική μοντελοποίηση του διαύλου που βασίζεται σε στατιστική χωροχρονική ανάλυση της απόσβεσης λόγω βροχής όπως περιγράφεται στο Παράρτημα Β. Σε συνδυασμό με χρήση προσαρμοστικής κωδικοποίησης ως αντίμετρου κατά των διαλείψεων η μοντελοποίηση του δορυφορικού διαύλου αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για ένα σχήμα κατανομής των πόρων που αξιοποιεί αποτελεσματικά τους πόρους του συστήμα-



Σχήμα 3.1: Γραφική παράσταση του PER συναρτήσει του E_b/n_0 για μέγεθος πλαισίου ίσο με 1Mbit.

τος ενώ ταυτόχρονα ικανοποιεί τις απαιτήσεις QoS.

Σύμφωνα με το πρότυπο DVB-RCS, η προβλεπόμενη απόσβεση λόγω βροχής αντισταθμίζεται μέσω προσαρμοστικής κωδικοποίησης. Ο ρυθμός κώδικα που χρησιμοποιείται επιλέγεται έτσι ώστε το εκάστοτε απαιτούμενο πλήθος πρόσθετων ψηφίων (redundant bits) να προσαρμόζεται στις συνθήκες του διαύλου.

Όπως προαναφέρθηκε, το πρότυπο προβλέπει ως εξωτερική κωδικοποίηση μια ελαττωμένη εκδοχή του κώδικα Reed-Solomon, RS(204,188), ενώ η εσωτερική κωδικοποίηση είναι συνελικτική κωδικοποίηση, που μπορεί να παρέχει διαφορετικά επίπεδα προστασίας από λάθη καθώς υποστηρίζει ρυθμούς κώδικα 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 και 7/8. Στο πρότυπο DVB-RCS, η κίνηση αποκωδικοποιείται ανά καταιγισμό. Στην εργασία [57], η εξάρτηση του ποσοστού λανθασμένων πακέτων (Packet Error Ratio, PER) από το λόγο ενέργειας ψηφίου προς πυκνότητα ισχύος θορύβου (bit energy-to-noise power density ratio, (E_b/n_0)) προσδιορίζεται ως συνάρτηση του μεγέθους του πλαισίου. Στο Σχ.3.1, το PER απεικονίζεται ως συνάρτηση του (E_b/n_0) για μέγεθος πλαισίου ίσο με 1Mbit. Επιπλέον, στον Πιν.3.1 παρουσιάζεται το ποσοστό πλεοναζόντων ψηφίων που απαιτείται για διάφορα επίπεδα απόσβεσης για *PER* = 10⁻³ και *PER* = 10⁻⁶.

$E_b/n_0(dB)$	Ρυθμός Κώδικα	Πλεονάζουσα Πληροφορία ($PER = 10^{-3}$)	$E_b/n_0(dB)$	Ρυθμός Κώδικα	Πλεονάζουσα Πληροφορία ($PER = 10^{-6}$)
0-3.1	1/2	100%	0-3.35	1/2	100%
3.1-3.55	2/3	50%	3.35-3.75	2/3	50%
3.55-3.9	3/4	33.3%	3.75-4.1	3/4	33.3%
3.9-4.5	5/6	20%	4.1-4.7	5/6	20%
4.5-4.8	7/8	14.3%	4.7-5.05	7/8	14.3%

Πίνακας 3.1: Λόγος σήματος προς θόρυβο συναρτήσει του PER

3.4 Υπολογισμός των πόρων

Κατά τη φάση υπολογισμού των πόρων, προσδιορίζονται οι πόροι που είναι απαραίτητοι για την εξασφάλιση ενός απαιτούμενου επιπέδου QoS. Καθώς στην πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου πολλαπλών συχνοτήτων MF-TDMA οι πόροι του συστήματος είναι οι χρονοσχισμές, η φάση υπολογισμού των πόρων αποσκοπεί στον προσδιορισμό του πλήθους των χρονοσχισμών που απαιτούνται για την έναρξη μιας σύνδεσης με το απαιτούμενο επίπεδο QoS.

Στην παρούσα ανάλυση λαμβάνονται υπόψη δύο παράμετροι: ο ρυθμός μετάδοσης (Information Data Rate) και το μέγιστο επιτρεπόμενο PER. Στόχος είναι η διατήρηση του PER κάτω από ένα προδιαγεγραμμένο επίπεδο με ταυτόχρονη εξασφάλιση σταθερού ρυθμού μετάδοσης. Υπό συνθήκες καθαρού ουρανού απαιτείται συγκεκριμένος αριθμός χρονοσχισμών για την ικανοποίηση του απαιτούμενου επιπέδου QoS. Ωστόσο, απαιτούνται πρόσθετες χρονοσχισμές ώστε να αντισταθμίζονται οι δυναμικές μεταβολές του δορυφορικού διαύλου που οφείλονται κυρίως στην απόσβεση λόγω βροχής. Ο στόχος του αλγορίθμου υπολογισμού των πόρων είναι ο προσδιορισμός του ελάχιστου αριθμού πρόσθετων χρονοσχισμών. Συγχρόνως, πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η απαιτούμενη επεξεργασία δεν είναι χρονοβόρα, καθώς στα δορυφορικά δίκτυα η πρόσθετη καθυστέρηση μετάδοσης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη.

Για τον υπολογισμό των πόρων έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι. Μία προσέγγιση είναι η πρόβλεψη του χειρότερου αναμενόμενου επιπέδου απόσβεσης την οποία θα υποστεί το σήμα κατά τη διάρκεια μιας σύνδεσης (worst case scenario). Παρά τις διακυμάνσεις της απόσβεσης εκχωρείται σταθερό πλήθος χρονοσχισμών, ικανό να αντισταθμίσει το χειρότερο δυνατό επίπεδο απόσβεσης. Καίτοι η μέθοδος αυτή επιτυγχάνει πάντα να εγγυάται τις απαιτήσεις PER, δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική διότι οδηγεί σε σημαντική σπατάλη χρονοσχισμών κατά τα χρονικά διαστήματα όπου οι διαλείψεις στο δορυφορικό δίαυλο είναι μικρότερες από τη χειρότερη περίπτωση. Μια άλλη προσέγγιση βασίζεται σε ανακατανομή των πόρων που ενεργοποιείται όταν απαιτείται μεταβολή στις παραμέτρους μετάδοσης ακόμα και ενός RCST. Καίτοι η μέθοδος αυτή επιτυγχάνει να εγγυηθεί τις απαιτήσεις QoS χωρίς σπατάλη χρονοσχισμών, μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα ping-pong και σε μη σταθερή επίδοση του συστήματος, όταν μια βροχόπτωση προκαλεί συχνές μεταβολές στις παραμέτρους μετάδοσης ενός μόνο RCST. Μια μεικτή στρατηγική φαίνεται η καταλληλότερη λύση.

Στη συνέχεια, με βάση την ανάλυση του φυσικού στρώματος προσδιορίζονται οι χρονικές στιγμές - στο εξής θα ονομάζονται χρονικές στιγμές ανακατανομής (Reallocation Instants, RI) - κατά τις οποίες απαιτείται ανανέωση των παραμέτρων μετάδοσης κάθε τερματικού. Προτείνεται ένας αλγόριθμος πολλαπλών μερικών αθροισμάτων για την επιλογή των καταλληλότερων προς ανακατανομή πλαισίων, με στόχο τη μεγιστοποίηση της διέλευσης του συστήματος. Καθώς το TBTP εκπέμπεται στην αρχή κάθε υπερπλαισίου, προσδιορίζεται η δυναμική οργάνωση των υπερπλαισίων του προτύπου DVB-RCS.

3.4.1 Αλγόριθμος από την πλευρά των τερματικών

Έστω N ο αριθμός των τερματικών στο δίκτυο. Ο αλγόριθμος από την πλευρά των τερματικών αποσκοπεί αρχικά στον προσδιορισμό των RI και στη συνέχεια, του συνολικού πλήθους χρονοσχισμών μέσα σε κάθε πλαίσιο. Η επεξεργασία βασίζεται σε χωρική και χρονική ανάλυση του φυσικού στρώματος και ολοκληρώνεται σε 4 βήματα.

- [Bήμα 1:] Έστω $(E_b/n_0)^{(n)}(t_0)$ ο λόγος σήματος προς θόρυβο του τερματικού $RCST^{(n)}$, n = 1, 2, ..., N, κατά την έναρξη της σύνδεσης. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο $(E_b/n_0)^{(n)}(t)$ προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας την ανάλυση του φυσικού στρώματος.
- [Βήμα 2:] Με χρήση του Πιν.3.1 και με βάση το $(E_b/n_0)^{(n)}(t)$ και τις απαιτήσεις PER, όλοι οι σταθμοί $RCST^{(n)}$ προσδιορίζουν τις στιγμές ανακατανομής τους, RI. Υποθέτοντας ότι ο χρόνος είναι κβαντισμένος σε πολλαπλάσια της διάρκειας του πλαισίου (26.5msec), τα RI στρογγυλοποιούνται κατάλληλα στο τέλος των αντίστοιχων πλαισίων. Έτσι κάθε τερματικό $RCST^{(n)}$ δημιουργεί το αντίστοιχο διάνυσμα $T^{(n)}$, n = 1, 2, ..., N, με στοιχεία τους

αριθμούς πλαισίων (*Frame_nbs*) στα οποία απαιτείται μεταβολή του ρυθμού κώδικα και, συνεπώς, των απαιτήσεων σε χρονοσχισμές.

- [Bήμα 3:] Από το διάνυσμα $\mathbf{T}^{(n)}$ και το $(E_b/n_0)^{(n)}(t)$, προσδιορίζονται τα απαιτούμενα πρόσθετα ψηφία και κατά συνέπεια οι απαιτήσεις χρονοσχισμών σε κάθε πλαίσιο $\mathbf{Y}^{(n)}$, n = 1, 2, ..., N.
- [Βήμα 4:] Τα διανύσματα $\mathbf{T}^{(n)}$, n = 1, 2, ..., N και $\mathbf{Y}^{(n)}$, n = 1, 2, ..., N αποστέλλονται στο NCC.

3.4.2 Αλγόριθμος από την πλευρά του κέντρου ελέγχου (NCC)

Μετά τη λήψη των διανυσμάτων $\mathbf{T}^{(n)}$ και $\mathbf{Y}^{(n)}$, το κέντρο ελέγχου NCC έπρεπε να επανεκχωgeí τους πόρους σε όλα τα πλαίσια που προσδιορίζονται από τα διανύσματα $\mathbf{T}^{(n)}$, δηλαδή ακόμα και όταν ένα τερματικό απαιτεί ανανέωση των παραμέτρων μετάδοσης, για να μην σπαταληθούν καθόλου πόροι. Ωστόσο, όταν υπάρχει ξαφνική βροχόπτωση, προκαλείται αστάθεια στο σύστημα. Το πρόβλημα επιδεινώνεται όταν ο αριθμός των τερματικών που εξυπηρετούνται από το σύστημα είναι πολύ μεγάλος, επειδή στην περίπτωση αυτή ο συνολικός αριθμός των πλαισίων για πιθανή ανακατανομή των πόρων είναι επίσης πολύ μεγάλος. Τέλος, υπάρχουν ενεργειακοί περιορισμοί του συστήματος που μειώνουν την ικανότητα ανακατανομής, διότι ο αλγόριθμος ανακατανομής θα πρέπει να εκτελείται συνέχεια στο NCC και να αποστέλλονται οι σχετικές πληροφορίες στα τερματικά. Συνεπώς, για τη μείωση του υπολογιστικού φόρτου, προτείνεται η επιλογή των καταλληλότερων για ανακατανομή πλαισίων ανάμεσα στα υποψήφια πλαίσια, όπως αυτά δηλώνονται από τα διανύσματα $\mathbf{T}^{(n)}$. Καθώς το TBTP πρέπει να ανανεώνεται στην αρχή κάθε υπερπλαισίου, με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται η βέλτιστη δομή υπερπλαισίων που μεγιστοποιεί τη διέλευση του συστήματος. Αυτό προσδιορίζεται ακολουθώντας τα ακόλουθα βήματα:

- [Βήμα1:] Το κέντρο ελέγχου NCC λαμβάνει και ταξινομεί όλα τα πλαίσια που είναι υποψήφια για ανακατανομή, όπως αυτά προσδιορίζονται από τα διανύσματα T⁽ⁿ⁾.
- [Βήμα2:] Σε κάθε πλαίσιο αθροίζονται οι απαιτήσεις όλων των τερματικών $RCST^{(n)}$, όπως αυτές δηλώνονται από τα διανύσματα $Y^{(n)}$, n = 1, 2, ..., N, ώστε σε κάθε πλαίσιο να αντιστοιχηθεί το συνολικό άθροισμα των απαιτήσεων σε χρονοσχισμές.

• [Βήμα3:] Υποθέτοντας ότι η διαδικασία ανακατανομής των πόρων μπορεί να εκτελεστεί Q φορές, ο συνολικός αριθμός πλαισίων πρέπει να διαιρεθεί σε Q υπερπλαίσια (SF) αρχίζοντας από τα Q καταλληλότερα για ανακατανομή πλαίσια. Το κριτήριο που χρησιμοποιείται για την βέλτιστη κατανομή των πόρων είναι ότι, αν κατά τη διάρκεια κάθε υπερπλαισίου, το κέντρο ελέγχου εκχωρεί πλήθος χρονοσχισμών ίσο με τις μέγιστες συνολικές απαιτήσεις των πλαισίων που αποτελούν το υπερπλαίσιο αυτό, το συνολικό πλήθος μη χρησιμοποιούμενων χρονοσχισμών θα ελαχιστοποιηθεί.

Συμβολίζοντας με $\mathbf{R}_i = [R_{i,1} \ R_{i,2} \cdots R_{i,l_i}], 1 \le i \le Q$ τις απαιτήσεις σε χρονοσχισμές στο υπερπλαίσιο SF_i και με $L = [l_1 \ l_2 \cdots \ l_Q]$ το πλήθος των πλαισίων σε κάθε SF, για την ολοκλήρωση του βήματος 3, πρέπει να λυθεί το ακόλουθο πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού.

ελαχιστοποίηση του
$$\sum_{i=1}^{Q} \sum_{j=1}^{l_i} \left(max \{ \mathbf{R}_i \} - R_{i,j} \right)$$
υπό την προϋπόθεση ότι
$$\sum_{i=1}^{Q} l_i = total \ frames$$
(3.1)

όπου max $\{\mathbf{R}_i\}$ είναι οι μέγιστες απαιτήσεις σε χρονοσχισμές μεταξύ των πλαισίων που ανήκουν στο υπερπλαίσιο SF_i .

3.4.3 Αλγόριθμος Πολλαπλών Μερικών Αθροισμάτων

Η βέλτιστη (ακφιβής) λύση του πφοβλήματος πφοκύπτει ελέγχοντας όλους τους διαφοφετικούς συνδυασμούς του L. Καίτοι ο τφόπος αυτός επίλυσης μποφεί να υπολοιηθεί σχετικά απλά, η πολυπλοκότητα αυξάνει εκθετικά με το πλήθος των ανακατανομών Q. Συνεπώς, αντί του πφοσδιοφισμού της βέλτιστης λύσης στο πφόβλημα της ανακατανομής, εισάγεται ένας νέος αλγόφιθμος πολλαπλών μεφικών αθφοισμάτων [69] μικφού υπολογιστικού κόστους που καταλήγει σε λύση κοντά στη βέλτιστη, όπως θα φανεί από τα αφιθμητικά αποτελέσματα. Υποθέτοντας ότι ο δοφυφοφικός δίαυλος είναι αφιών διαλείψεων (slow fading channel), ο πφοτεινόμενος αλγόριθμος σχηματοποιείται ως εξής:

1. Φάση Έναρξης

Έστω $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} \cdots & d_{i,j} \cdots & d_{Q,l_Q-1} \end{bmatrix}, 1 \le i \le Q, 1 \le j \le l_i - 1$ πίνακας με στοιχεία $d_{ij} = |R_{i,j} - R_{i,j+1}|$. Δηλαδή ο πίνακας \mathbf{D} έχει ως στοιχεία τις απόλυτες τιμές της διαφοράς των απαιτήσεων σε



Σχήμα 3.2: Δυναμικός προσδιορισμός δομής υπερπλαισίων χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο πολλαπλών μερικών αθροισμάτων.

διαδοχικά πλαίσια.

2. Ταξινόμηση

Τα στοιχεία του D ταξινομούνται με χρήση του αλγορίθμου ταχείας ταξινόμησης (Quick Sort).

3. Επιλογή των πλαισίων ανακατανομής.

Καθώς το πλήθος εκτέλεσης του αλγορίθμου κατανομής των πόρων είναι Q, επιλέγονται τα Q - 1 στοιχεία του **D** με τις μεγαλύτερες τιμές. Αυτά τα στοιχεία ορίζουν τα κατάλληλα πλαίσια ανακατανομής και, συνεπώς, την αρχή των υπερπλαισίων (SFs).

Στο Σχ.3.2 απεικονίζεται η εφαρμογή του αλγορίθμου πολλαπλών μερικών αθροισμάτων για τη δυναμική οργάνωση των υπερπλαισίων (SFs). Ο πίνακας **R** δηλώνει τις πραγματικές συνολικές απαιτήσεις σε κάθε πλαίσιο ενώ ο πίνακας **D** τις απόλυτες τιμές της διαφοράς των απαιτήσεων σε διαδοχικά πλαίσια. Για τον υπολογισμό του πίνακα **R** χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο απόσβεσης που περιγράφεται στην εργασία [116]. Στο παράδειγμα που περιγράφεται στο Σχ.3.2, λαμβάνεται υπόψη μια σειρά 30 διαδοχικών πλαισίων, ενώ το πλήθος των επαναλήψεων του αλγορίθμου ανακατανομής λαμβάνεται Q = 5. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο πολλαπλών αθροισμάτων, επιλέγονται οι Q - 1 = 4 μεγαλύτερες τιμές του **D**. Αυτές οι τιμές προσδιορίζουν τις κατάλληλες στιγμές για την εκπομπή του TBTP και κατεπέκταση τη διάρκεια των υπερπλαισίων. Στο παράδειγμα αυτό, οι μεγαλύτερες τιμές του **D** αντιστοιχούν στα πλαίσια 6, 13, 17 και 23 και, συνεπώς, το TBTP εκπέμπεται στην αρχή των πλαισίων που ακολουθούν τα πλαίσια αυτά, δηλαδή τα 6, 13, 17 και 23. Επομένως, σύμφωνα με την ομαδοποίηση των πλαισίων που προκύπτει χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο πολλαπλών αθροισμάτων, η διάρκεια των υπερπλαισίων (SFs) 1-5 είναι 6, 7, 4, 6 και 7 πλαίσια αντίστοιχα, όπως φαίνεται στα Σχ.3.2(b) και Σχ.3.2(c).

3.5 Εκχώρηση των Πόρων

3.5.1 Περιγραφή του προβλήματος

Μετά τον υπολογισμό του πλήθους των χρονοσχισμών που εκχωρείται προς κάθε τερματικό σε κάθε πλαίσιο και τον προσδιορισμό της δομής των υπερπλαισίων, ένα TBTP πρέπει να εκπεμφθεί σε όλα τα τερματικά στην αρχή κάθε υπερπλαισίου. Για το σκοπό αυτό, το NCC εκτελεί τον αλγόριθμο εκχώρησης των πόρων για τον προσδιορισμό της συχνότητας και της θέσης μέσα στο πλαίσιο που εκχωρείται σε κάθε τερματικό. Η φάση εκχώρησης των πόρων ασχολείται με την τοποθέτηση των χρονοσχισμών που αιτούνται από τα τερματικά στο πλαίσιο MF-TDMA. Για το πρόβλημα εκχώρησης των πόρων εξετάζεται ο πλέον αποδοτικός αλγόριθμος λαμβάνοντας υπόψη ότι οι χρονοσχισμές πρέπει να εκχωρούνται κατά καταιγισμούς, και ο περιορισμός που τίθεται από τη δομή του πλαισίου MF-TDMA ότι το ίδιο τερματικό δεν μπορεί να εκπέμπει την ίδια χρονική στιγμή σε δύο διαφορετικά φέροντα.

Το πρόβλημα εκχώρησης πόρων στην ανοδική ζεύξη δεν έχει μελετηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία. Το πρόβλημα έχει αντιμετωπιστεί χρησιμοποιώντας ευριστικούς αλγορίθμους [70] ή αλγορίθμους τοποθέτησης σε δοχεία (Bin-packing) [60], χωρίς όμως μια εκτενή παρουσίαση των αλγορίθμων αυτών και του τρόπου εφαρμογής τους για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Στην εργασία [17], προτείνεται αλγόριθμος για την επίλυση του προβλήματος της εκχώρησης πόρων που όμως επιτυγχάνει τη μεγιστοποίηση της διέλευσης του συστήματος μόνο για περιορισμένο εύρος τιμών των παραμέτρων του συστήματος.

Ο αλγόριθμος που προτείνεται στην παράγραφο αυτή θεωρεί το πρόβλημα εκχώρησης των πόρων ως υποκατηγορία του προβλήματος Bin-packing που διατυπώνεται ως εξής: Έστω πεπερασμένο πλήθος βαρών w_d , d = 1, 2, ..., D και ένα πλήθος όμοιων δοχείων με χωρητικότητα $C > max(w_d)$. Το πρόβλημα Bin-packing είναι ο προσδιορισμός του ελάχιστου πλήθους δοχείων ώστε όλα τα βάρη να τοποθετηθούν μέσα σε κάποιο δοχείο.

Στο πρόβλημα εκχώρησης των πόρων για άνω ζεύξεις MF-TDMA, τα βάρη είναι οι καταιγισμοί χρονοσχισμών που αιτούνται από τα τερματικά και τα δοχεία είναι τα φέροντα που όλα περιέχουν T χρονοσχισμές. Το πρόβλημα είναι να εκχωρηθούν όλοι οι καταιγισμοί στα φέροντα ελαχιστοποιώντας το πλήθος των αχρησιμοποίητων χρονοσχισμών. Στο πλαίσιο αυτό προτείνεται ένας υβριδικός αλγόριθμος τοποθέτησης σε δοχεία (*Hybrid Bin-packing Algorithm*) που μεγιστοποιεί τη χρησιμοποίηση του πλαισίου MF-TDMA λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες παραμέτρους του συστήματος.

3.5.2 Υβοιδικός Αλγόοιθμος Bin-packing

Ο Υβριδικός Αλγόριθμος Bin-packing είναι ένα υβριδικό σχήμα εκχώρησης των πόρων που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα δύο, γνωστών στη βιβλιογραφία, μεθόδων τοποθέτησης σε δοχεία, της βέλτιστης προσαρμογής (Best-Fit) και του αλγορίθμου κράτησης καναλιού με προτεραιότητα (Reserve Channel with Priority, RCP-Fit), με στόχο την αποτελεσματική χρησιμοποίηση των πόρων. Ο αλγόριθμος βέλτιστης προσαρμογής ενσωματώνει τον καταιγισμό που φθάνει, στο πρώτο φέρον που έχει τον ελάχιστο ελεύθερο χώρο, με ικανή, ωστόσο, χωρητικότητα για να μεταδοθεί ο καταιγισμός. Όταν δύο ή περισσότερα φέροντα διαθέτουν τον ίδιο ελεύθερο χώρο, ο καταιγισμός τοποθετείται στο φέρον με το μικρότερο αύξοντα αριθμό με αρίθμηση εν των άνω προς τα κάτω.

Ο αλγόριθμος κράτησης καναλιού με προτεραιότητα κάνει κράτηση ενός φέροντος για κάθε ενεργό τερματικό ώστε να μπορεί σε αυτό το φέρον να μεταδώσει όλους τους καταιγισμούς του.



Σχήμα 3.3: Ποσοστό μη χρησιμοποίησης (NU) συναρτήσει του πλήθους των τερματικών u (c = 70, s = 60, l = 20).

Στην περίπτωση όπου ο αριθμός των ενεργών τερματικών υπερβαίνει τον αριθμό των φερόντων, τα πρόσθετα τερματικά μεταδίδουν στα φέροντα των τερματικών με το μικρότερο φορτίο κίνησης [17].

Η επίδοση του αλγορίθμου βέλτιστης προσαρμογής και κράτησης καναλιού με προτεραιότητα αποτιμάται σε όρους ποσοστού μη χρησιμοποιούμενων χρονοσχισμών ανά πλαίσιο, που στο εξής θα αναφέρεται ως ποσοστό μη χρησιμοποίησης (Non-Utilization, NU). Οι παράμετροι του δικτύου που επηρεάζουν το ποσοστό μη χρησιμοποίησης είναι το πλήθος των τερματικών, των φερόντων και των χρονοσχισμών στο πλαίσιο MF-TDMA που συμβολίζονται ως u, c και s, αντίστοιχα και το μέγιστο φορτίο κίνησης l που αιτείται από τα τερματικά. Το πλήθος των χρονοσχισμών (δηλαδή το φορτίο κίνησης) που αιτείται από κάθε τερματικό υποτίθεται ομοιόμορφα κατανεμημένο στο διάστημα [0, l].

Από προσομοιώσεις των δύο αλγορίθμων προέκυψαν οι γραφικές παραστάσεις του ποσοστού μη χρησιμοποίησης συναρτήσει των παραμέτρων του δικτύου που απεικονίζονται στα Σχ.3.3-3.6. Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι για κάθε μια από τις παραμέτρους u, c, s και lυπάρχει ένα κατώφλιο που επιβάλλει αλλαγή αλγορίθμου εκχώρησης των πόρων με στόχο την ελαχιστοποίηση του ποσοστού μη χρησιμοποίησης. Όταν είναι γνωστές οι παράμετροι του δικτύου είναι επιθυμητό να προσδιορίζεται εκ των προτέρων το σχήμα εκχώρησης των πόρων



Σχήμα 3.4: Ποσοστό μη χρησιμοποίησης (NU) συναρτήσει του πλήθους των φερόντων c (s = 80, l = 40, u = 1000).



Σχήμα 3.5: Ποσοστό μη χρησιμοποίησης (NU) συναρτήσει του πλήθους των χρονοσχισμών s (c = 70, l = 30, u = 1500).



Σχήμα 3.6: Ποσοστό μη χρησιμοποίησης (NU) συναρτήσει του μέγιστου φορτίου l (c = 100, s = 100, u = 1500).

που μεγιστοποιεί τη διέλευσή του. Ωστόσο, έχει αποδειχθεί ότι το πρόβλημα Bin-packing είναι μη ολοκληρώσιμο με πολυωνυμική πολυπλοκότητα (NP-complete) [71]. Επιπλέον, η θεωρητική ανάλυση των αλγορίθμων εκχώρησης των πόρων είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, ακόμα και για το στατικό πρόβλημα τοποθέτησης σε δοχεία [72]. Συνεπώς, είναι πολύ δύσκολη η εξαγωγή αναλυτικών σχέσεων που περιγράφουν την επίδοση των αλγορίθμων αυτών συναρτήσει των παραμέτρων του δικτύου.

Για το λόγο αυτό, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που θέτει το πλαίσιο MF-TDMA και εφαρμόζοντας κατάλληλη ανάλυση προσαρμογής παλινδρόμησης (regression fitting analysis), προτείνονται απλές εκφράσεις που εκτιμούν τη σπατάλη των πόρων του συστήματος για τους αλγορίθμους Best-Fit και RCP-Fit αντίστοιχα. Οι σχέσεις που προκύπτουν εκφράζουν το ποσοστό μη χρησιμοποίησης ως συνάρτηση των παραμέτρων *c*, *s*, *u* και *l*. Οι απλές σχέσεις που προκύπτουν από κατάλληλη προσαρμογής παλινδρόμησης και παρέχουν εκτίμηση του ποσοστού μη χρησιμοποίησης του δικτύου για τους αλγορίθμους Eest-Fit και RCP-Fit αντίστοιχα αλγορίθμους εκχώρησης Best-Fit και RCP-Fit αντίστοιχα είναι

$$NU_{BF}(c, s, u, l) = A_1 \cdot exp\left(-B_1 \cdot u\right)$$
(3.2)

$$NU_{RCP}(c, s, u, l) = A_2 \cdot u^{-B_2}$$
(3.3)

όπου τα A_1 , B_1 , A_2 , B_2 δίνονται από

$$A_{1} = 97.292 \cdot exp(9 \cdot 10^{-4} s) \cdot exp(32 \cdot 10^{-4} \cdot l)$$

$$B_{1} = 10^{-3} \cdot (44.888 \cdot c^{-1.4308}) \cdot s^{1.1} \cdot exp(6 \cdot 10^{-2} \cdot l)$$

$$A_{2} = 47.728 \cdot (1 - 3.41 \cdot 10^{-5} \cdot (c - 65.969)^{2} \cdot s^{0.177} \cdot (1 + 1.014 \cdot exp(1.5 \cdot 10^{-2}l)))$$

$$B_{2} = (0.769 - 0.1074 \cdot lnc) \cdot exp(-0.9246 \cdot s^{-0.9129} \cdot l)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι σχέσεις (3.2) και (3.3) έχουν ισχύ υπό τον περιορισμό ότι οι παράμετροι c, s, u και l μεταβάλλονται στα ακόλουθα εύρη τιμών:

$$1 \le c \le 100, \ 1 \le s \le 100, \ 1 \le u \le 3000, \ 1 \le l \le 100$$
 (3.4)

Οι σχέσεις (3.2) και (3.3) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιλογή του σχήματος που μεγιστοποιεί τη διέλευση του συστήματος. Δηλαδή, αν κάποια από τις προηγούμενες παραμέτρους μεταβάλλεται, ο Υβριδικός Αλγόριθμος Τοποθέτησης σε δοχεία μπορεί να αξιοποιηθεί για την επιλογή του εύρους τιμών που μπορεί να λάβει η μεταβαλλόμενη παράμετρος ώστε να μεγιστοποιηθεί η διέλευση του συστήματος. Από την άλλη πλευρά, αν το εύρος τιμών της μεταβαλλόμενης παραμέτρου είναι σταθερό, η επιλογή του κατάλληλου σχήματος πραγματοποιείται με βάση τον εξής αλγόριθμο.

Έστω ότι
 η παράμετρος k, k = c, s, u, l, μεταβάλλεται. Η τιμ
ή k_{thr} που επιβάλλει αλλαγή στον αλγόριθμο εκχώρησης πόρων προκύπτει ως λύση της εξίσωσης

$$NU_{BF}(\ldots,k_{thr},\ldots) = NU_{RCP}(\ldots,k_{thr},\ldots)$$
(3.5)

Τότε, το κατάλληλο σχήμα εκχώρησης πόρων επιλέγεται ως εξής:

if
$$k < k_{thr}$$
 select
 RCP Fit $k = c, l$
 RCP Fit $k = s, u$

if $k > k_{thr}$ select RCP Fit k = c, l

3.6 Προσομοιώσεις και Αριθμητικά Αποτελέσματα

3.6.1 Περιβάλλον Προσομοίωσης

Για την εκτίμηση της επίδοσης του προτεινομένου αλγορίθμου δύο φάσεων, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε περιβάλλον Matlab. Για την προσομοίωση της απόσβεσης λόγω βροχής υιοθετήθηκε η μέθοδος που προτείνεται στην εργασία [116] για την παραγωγή ενός μεγάλου αριθμού χρονοσειρών που προέρχονται από πειραματικά δεδομένα απόσβεσης. Οι παράμετροι διάδοσης που χρησιμοποιήθηκαν εκτιμήθηκαν με βάση την αναφορά [123]. Για την προσομοίωση θεωρήθηκε ότι το εύρος ζώνης της ανοδικής ζεύξης αποτελείται από 16 πλαίσια, ενώ 15 τερματικά επιδιώκουν να μεταδώσουν υπηρεσία με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης 2048 Mbps, Η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος θεωρήθηκε ίση με 30 GHz.

3.6.2 Φάση Υπολογισμού των Πόρων

Η καλύτερη επίδοση του προτεινομένου αλγορίθμου σε σύγκριση με τον αλγόριθμο που προτείνεται στην εργασία [17], όπου εκχωρείται ένας σταθερός αριθμός χρονοσχισμών σε όλη τη διάρκεια της σύνδεσης απεικονίζεται στο Σχ.3.7. Θεωρείται ότι 16 πλαίσια είναι υποψήφια για ανακατανομή των πόρων και ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να εκτελεστεί 3 φορές. Οι κύκλοι αναπαριστούν τις πραγματικές απαιτήσεις σε χρονοσχισμές, ενώ τα μαύρα τετράγωνα τις απόλυτες τιμές των διαφορών των απαιτήσεων σε διαδοχικά πλαίσια. Αν δεν χρησιμοποιηθεί η τεχνική ανακατανομής των πόρων, οι μη χρησιμοποιηθέντες πόροι παριστάνονται από την επιφάνεια (A+B+C+D), ενώ με τη χρήση του αλγορίθμου μερικών πολλαπλών αθροισμάτων παριστάνονται από την επιφάνεια (B+C+D). Ο προτεινόμενος αλγόριθμος μειώνει τους μη χρησιμοποιούμενους πόρους κατά ένα ποσοστό 85% σε σύγκριση με τη μέθοδο σταθερής εκχώρησης.



Σχήμα 3.7: Μη χρησιμοποιούμενες χρονοσχισμές συναρτήσει του χρόνου με τη χρήση ή όχι του αλγορίθμου πολλαπλών μερικών αθροισμάτων.



Σχήμα 3.8: Γραφική παράσταση του κανονικοποιημένου ποσοστού μη χρησιμοποιούμενων πόρων συναρτήσει του αριθμού εκτέλεσης των τριών αλγορίθμων κατάνομής των πόρων.

Η επίδοση των τριών αλγορίθμων υπολογισμού των πόρων σε όρους μη χρησιμοποιημένων χρονοσχισμών απεικονίζεται στο Σχ.3.8, όπου απεικονίζεται το κανονικοποιημένο ποσοστό μη χρησιμοποιημένων χρονοσχισμών ως συνάρτηση του πλήθους εκτέλεσης των αλγορίθμων. Είναι φανερό ότι όταν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος σταθερής εκχώρησης που περιγράφεται στην εργασία [17], το ποσοστό μη χρησιμοποιημένων χρονοσχισμών παραμένει σταθερό. Αντίθετα, όταν υιοθετείται το σχήμα ανακατανομής των πόρων, οι μη χρησιμοποιημένες χρονοσχισμές μειώνονται σημαντικά. Καίτοι ο αλγόριθμος μερικών πολλαπλών αθροισμάτων έχει ελαφρώς χειρότερη επίδοση από τη βέλτιστη λύση που εκτελεί τον αλγόριθμο ανακατανομής μόλις υπάρξει μεταβολή των παραμέτρων μετάδοσης ενός τερματικού, υπερέχει σημαντικά ως προς το απαιτούμενο υπολογιστικό κόστος.

3.6.3 Φάση Εκχώρησης των Πόρων

Η επίδοση του Υβριδικού Αλγορίθμου Τοποθέτησης σε δοχεία μπορεί να εκτιμηθεί εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο στην άνω ζεύξη ενός συστήματος DVB-RCS που χρησιμοποιεί την πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου πολλαπλών συχνοτήτων. Για την προσομοίωση έγιναν οι παρακάτω υποθέσεις:

- · Η δομή του πλαισίου MF-TDMA είναι 70 συχνότητες με 60 χρονοσχισμές η καθεμία.
- Ο παράγοντας φορτίου είναι 20, δηλαδή το φορτίο κίνησης των τερματικών εκφρασμένο
 σε χρονοσχισμές είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στο διάστημα [0, 20].

Στο Σχ.3.9 παξουσιάζεται η γραφική παράσταση του ποσοστού μη χρησιμοποίησης των πόρων ως συνάρτηση του πλήθους των χρηστών. Οι τιμές κατωφλίου που προκύπτουν από την προσομοίωση και τις προτεινόμενες αναλυτικές εκφράσεις δηλώνονται ως u_{thr} και \overline{u}_{thr} , αντίστοιχα. Είναι φανερό ότι οι προτεινόμενες αναλυτικές εκφράσεις περιγράφουν με αρκετά μεγάλη ακρίβεια την επίδοση του δικτύου.

Για τη σύγκριση της επίδοσης των τριών αλγορίθμων τοποθέτησης σε δοχεία (Υβριδικός, Best-Fit και RCP-Fit) εισάγεται ως μέτρο σύγκρισης το σταθμισμένο μέσο ποσοστό μη χρησιμοποίησης



Σχήμα 3.9: Ποσοστό μη χρησιμοποίησης συναρτήσει του πλήθους των χρηστών όπως προκύπτει από την προσομοίωση και τις αναλυτικές εκφράσεις.



Σχήμα 3.10: Σταθμισμένο ποσοστό μη χρησιμοποίησης NU ανά χρήστη λ για τους τρεις αλγορίθμους τοποθέτησης σε δοχεία (Υβριδικός, Best-Fit και RCP-Fit) για $s = 32, c \in \{40, 50, 60\}, l \in \{8, 16, 24, 32, 48\}$.



Σχήμα 3.11: Σταθμισμένο ποσοστό μη χρησιμοποίησης NU ανά χρήστη λ για τους τρεις αλγορίθμους τοποθέτησης σε δοχεία (Υβριδικός, Best-Fit και RCP-Fit) για s = 48, $c \in \{40, 50, 60\}, l \in \{8, 16, 24, 32, 48\}$.

ΝU_i ανά χρήστη, δηλαδή το μέσο ποσοστό χρονοσχισμών που δεν χρησιμοποιούνται ανά χρήστη

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^{N} NU_i \times u_i}{\sum_{i=1}^{N} u_i}$$
(3.6)

όπου το u_i δηλώνει το πλήθος των χρηστών (N = 3000 στην περίπτωση της προσομοίωσης). Στα Σχ.3.10 και 3.11, συγκρίνονται οι τρεις αλγόριθμοι τοποθέτησης σε δοχεία με κριτήριο το λ . Η εφαρμογή του Υβριδικού Σχήματος Τοποθέτησης σε δοχεία οδηγεί σε μείωση του λ σε σχέση είτε με το σχήμα Best-Fit είτε με το σχήμα RCP-Fit για οποιοδήποτε συνδυασμό των παραμέτρων του δικτύου. Ενδεικτικά, για c = 60, s = 32, l = 32, το Υβριδικό Σχήμα προκαλεί μείωση του λ σε σύγκριση με το Best-Fit κατά 47%, ενώ για c = 40, s = 48, l = 8 υπερτερεί έναντι του RCP-Fit κατά 78%.

Κεφάλαιο 4

Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων υπό Συνθήκες Διαλείψεων

4.1 Εισαγωγή-Επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας

Η διαχείριση των πόρων (Radio Resource Management, RRM) στα δορυφορικά δίκτυα στοχεύει να εξασφαλίσει τη δίκαιη κατανομή των διαθέσιμων πόρων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το συνολικό εύρος ζώνης πρέπει να κατανεμηθεί σε ένα πλήθος χρηστών και ταυτοχρόνως να ικανοποιεί τις προκαθορισμένες απαιτήσεις QoS για όλη τη διάρκεια της σύνδεσης. Μία από τις σημαντικότερες λειτουργίες διαχείρισης των πόρων είναι ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων (Call Admission Control, CAC). Ο CAC περιλαμβάνει το σύνολο των λειτουργιών που πραγματοποιούνται από το δορυφορικό δίκτυο κατά τη φάση εγκατάστασης μιας νέας σύνδεσης, δηλαδή κατά τη φάση διακανονισμού όπου αποφασίζεται αν η αίτηση σύνδεσης ενός νέου χρήστη θα γίνει αποδεκτή ή θα απορειφθεί. Η αίτηση ενός νέου χρήστη γίνεται αποδεκτή υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι που εγγυώνται τις απαιτήσεις QoS όλων των ήδη συνδεδεμένων χρηστών και του χρήστη που κάνει την αίτηση. Γενικά, ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων καταλήγει στη μη αποδοχή νέων αιτήσεων ή στην απόρριψη κλήσεων κατά τη διάρκεια των οποίων το εύρος ζώνης που απαιτείται υπερβαίνει τους διαθέσιμους πόρους. Ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων πραγματοποιείται από το κέντρο ελέγχου NCC και αποτελεί λειτουργία μεγάλης σημασίας για την εξασφάλιση υψηλού ποσοστού χρησιμοποίησης των δορυφορικών πόρων. Ωστόσο, σε μη γεωστατικά δορυφορικά συστήματα η λειτουργία αυτή πραγματοποιείται on board από το δοευφόεο.

Το πρόβλημα του ελέγχου αποδοχής κλήσεων έχει μελετηθεί εκτενώς στη βιβιογραφία. Στις εργασίες [74] και [75] παρατίθεται επισκόπηση των αλγορίθμων ελέγχου αποδοχής κλήσεων για ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών και κυψελωτά δίκτυα, αντίστοιχα. Οι αλγόριθμοι ελέγχου αποδοχής κλήσεων σε ασύρματα δίκτυα διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες:

- Πλήρους Συμμετοχής (Complete Sharing, CS)
- Πλήφους Διαμελισμού (Complete Partitioning, CP)
- Σχήματα με κράτηση πόρων (Reservation Schemes)
- Σχήματα με κατώφλιο (Threshold Schemes)

Στα σχήματα πλήφους συμμετοχής ένας χφήστης γίνεται δεκτός από το σύστημα αν υπάφχουν διαθέσιμοι πόφοι για την ικανοποίηση των αναγκών του τη στιγμή της αίτησης. Στην περίπτωση αυτή όλες οι κλάσεις υπηρεσιών μοιράζονται το ίδιο εύρος ζώνης και ο μόνος περιορισμός που τίθεται στην αποδοχή ενός νέου χφήστη είναι το συνολικό εύρος ζώνης του δικτύου. Το σχήμα αυτό επιτυγχάνει τη βέλτιστη αξιοποίηση του εύρους ζώνης του δικτύου. Ωστόσο, σύμφωνα με τη στρατηγική αυτή οι συνδέσεις μικρότερων απαιτήσεων σε εύρος ζώνης έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να γίνουν αποδεκτές σε σχέση με συνδέσεις μεγαλύτερων απαιτήσεων. Έτσι, δεν λαμβάνεται υπόψη η ενδεχόμενη προτεραιότητα μιας σύνδεσης κατά την κατανομή των πόρων, οπότε στην περίπτωση πολλών κλάσεων υπηρεσιών υπάρχει ο κίνδυνος οι συνδέσεις μιας υπηρεσίας να καταλάβουν μεγάλο ποσοστό του εύρους ζώνης σε βάρος των άλλων κλάσεων. Σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων πλήρους συμμετοχής σε δορυφορικά δίκτυα έχουν προταθεί στις εργασίες [76]-[79].

Οι στρατηγικές Πλήρους Διαμελισμού των πόρων αποτελούν την άλλη ακραία περίπτωση σχημάτων ελέγχου αποδοχής κλήσεων. Σύμφωνα με τα σχήματα αυτά το εύρος ζώνης διαχωρίζεται σε τμήματα. Σε κάθε κλάση υπηρεσίας εκχωρείται ένα τμήμα των συνολικών πόρων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο από την κλάση αυτή. Οι στρατηγικές Πλήρους Διαμελισμού εγγυώνται τις απαιτήσεις QoS των υπηρεσιών αυτών. Δυσλειτουργία στην περίπτωση αυτή προκύπτει όταν κάποια από τις υπηρεσίες δεν χρησιμοποιεί όλους τους πόρους που της έχουν εκχωρηθεί, οπότε προκαλείται σπατάλη πόρων. Η χρησιμοποίηση των πόρων στην περίπτωση αυτή μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση κάποιου σχήματος κινητού ορίου (Movable Boundary) σύμφωνα με το οποίο το τμήμα του εύξους ζώνης που εκχωξείται σε κάθε κλάση υπηξεσιών πξοσαξμόζεται δυναμικά στις μεταβολές του φοξτίου κίνησης [80] και της κατάστασης του διαύλου. Στην εξγασία [81] προτείνεται ένας αντίστοιχος διαστρωματικός αλγόξιθμος που προσαξμόζει δυναμικά το τμήμα του εύξους ζώνης που εκχωξείται σε κάθε κλάση υπηξεσιών στις μεταβολές της κίνησης και των συνθηκών του διαύλου για δοξυφοξικά δίκτυα επικοινωνιών.

Για την αντιμετώπιση των δύο ακραίων περιπτώσεων προτάθηκαν τα σχήματα κράτησης πόρων ([82]- [83]). Σύμφωνα με τη στρατηγική των σχημάτων αυτών κάθε κλάση k συνδέεται με μία παράμετρο κράτησης r_k . Ένας χρήστης της κλάσης k γίνεται δεκτός αν το σύστημα διαθέτει τουλάχιστον r_k πόρους για τις υπόλοιπες κλάσεις υπηρεσιών. Στην εργασία [82] προτείνεται ένας αλγόριθμος ελέγχου αποδοχής κλήσεων για ΑΤΜ δορυφορικά δίκτυα. Στην προσέγγιση αυτή η κίνηση κατηγοριοποιείται σε τέσσερεις κλάσεις υπηρεσιών: σταθερού ρυθμού μετάδοσης CBR, πραγματικού χρόνου μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης (real time-VBR), μη πραγματικού χρόνου μεταβλητού ουθμού μετάδοσης (non real time-VBR) και απροσδιόριστου ουθμού μετάδοσης UBR. Το σχήμα στηρίζεται στη στατιστική πολυπλεξία της κίνησης μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης και προβλέπει μόνιμες συνδέσεις για την κίνηση CBR και ημιμόνιμες συνδέσεις για τα υπόλοιπα τρία είδη κίνησης. Η ιδέα του αλγορίθμου στηρίζεται στην εισαγωγή της πιθανότητας υπέρβασης αιτήσεων (excess demand probability) δηλαδή της πιθανότητας ότι μια κλήση που γίνεται αποδεκτή θα ζητήσει κατά τη διάρκεια της σύνδεσής της περισσότερους πόρους από τους διαθέσιμους. Για την αποδοχή μιας νέας κλήσης απαιτούνται δύο έλεγχοι. Κατά τον πρώτο ελέγχεται ότι η πιθανότητα υπέφβασης αιτήσεων για όλα τα είδη υπηφεσιών είναι μικρότερη από ένα προκαθορισμένο κατώφλιο, ενώ ο δεύτερος έλεγχος εξασφαλίζει ότι η πιθανότητα υπέρβασης αιτήσεων της κίνησης πραγματικού χρόνου είναι μικρότερη από ένα χαμηλότερο κατώφλιο σε σχέση με αυτό της πρώτης σύγκρισης. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζονται οι αυστηρότερες απαιτήσεις QoS της κίνησης πραγματικού χρόνου. Στην εργασία [83], ένας παρόμοιος αλγόριθμος για DVB-RCS δορυφορικά δίκτυα ελέγχεται μέσω προσομοίωσης για τα διάφορα είδη κίνησης που προβλέπει το πρότυπο.

Τα σχήματα με κατώφλιο ([84]) ακολουθούν την ίδια λογική με τα σχήματα κράτησης πόρων. Σύμφωνα με τα σχήματα αυτά κάθε κλάση k συνδέεται με ένα κατώφλιο t_k . Ένας χρήστης της κλάσης k γίνεται δεκτός αν μετά την αποδοχή του οι πόροι που έχουν διατεθεί στους χρήστες της κλάσης k δεν υπερβαίνουν το κατώφλιο t_k . Στην εργασία [84] παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος

κατανομής πόφων και ελέγχου αποδοχής κλήσεων για γεωστατικά δοφυφοφικά συστήματα που ονομάζεται στφατηγική δυναμικού κινητού οφίου (Dynamic Movable Boundary Strategy). Σύμφωνα με την πφοτεινόμενη στφατηγική, το σχήμα πολλαπλής πφοσπέλασης που χφησιμοποιείται είναι διαίφεσης χφόνου (TDMA) και το πλαίσιο διαιφείται σε τφία τμήματα. Το πφώτο τμήμα πφοοφίζεται για κίνηση CBR, το δεύτεφο για κίνηση μη πφαγματικού χφόνου και το τφίτο τμήμα χφησιμοποιείται ως τφάπεζα κοινών πόφων. Σύμφωνα με το πφοτεινόμενο σχήμα η απόφαση για την αποδοχή μιας νέας κλήσης λαμβάνεται πεφιοδικά, στην αφχή ενός χφονικού διαστήματος που ονομάζεται πεφίοδος ελέγχου και είναι ανάλογη με το μεταβαλλόμενο φοφτίο του δικτύου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαστρωματικοί αλγόριθμοι ελέγχου αποδοχής κλήσεων για δορυφορικά δίκτυα επικοινωνιών που ακολουθούν τη στρατηγική πλήρους συμμετοχής. Τα προτεινόμενα σχήματα βασίζονται στην ανάλυση του δορυφορικού διαύλου για την εκτίμηση του αναμενόμενου επιπέδου απόσβεσης και, στη συνέχεια, χρησιμοποιούν προσαρμοστική κωδικοποίηση και διαμόρφωση ACM για την αντιστάθμιση των διαλείψεων. Διαστρωματικοί αλγόριθμοι ελέγχου αποδοχής κλήσεων για ασύρματα δίκτυα παρουσιάζονται στις εργασίες [85], [86]. Παρόμοια σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες διαλείψεων για διαύλους Rayleigh προτείνονται στις εργασίες [87], [88].

Στο κεφάλαιο αυτό παφουσιάζονται κεντφικά ελεγχόμενοι αλγόφιθμοι ελέγχου αποδοχής κλήσεων. Στο επόμενο κεφάλαιο εφαφμόζεται n ίδια λογική για τη δημιουφγία κατανεμημένων αλγοφίθμων σύμφωνα με τους οποίους κάθε χφήστης ανεξάφτητα και εγωιστικά αποφασίζει αν θα κάνει δεκτό στο σύστημα ένα καινούφιο χφήστη. Η χφήση των κατανεμημένων αλγοφίθμων είναι καταλληλότεφη για πεφιπτώσεις εκτάκτου ανάγκης, κατά τις οποίες n αποδοχή ενός νέου χφήστη στο σύστημα πφέπει να γίνει σε μικφό χφονικό διάστημα με αντίτιμο την μετάδοση πεφισσοτέφων δεδομένων στο δίκτυο καθώς όλοι οι χφήστες πφέπει να ενημεφωθούν για την αποδοχή του νέου χφήστη.

Η μελέτη της επίδοσης των προτεινόμενων σχημάτων πραγματοποιείται με χρήση μοντέλων Markov μέσω των οποίων προκύπτουν αναλυτικοί τύποι για την πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες καθαρού ουρανού και όρια της ίδιας πιθανότητας υπό συνθήκες διαλείψεων. Στην περίπτωση των κεντρικά ελεγχόμενων αλγορίθμων, η ανάλυση πραγματοποιείται αρχικά για την περίπτωση μιας κλάσης υπηρεσιών CBR και, στη συνέχεια, επεκτείνεται στην περίπτωση δύο κλάσεων υπηρεσιών (κίνηση πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου). Στη δεύτερη περί-

πτωση, στο σχήμα ενσωματώνεται η έννοια της προτεραιότητας της κίνησης πραγματικού χρόνου έναντι της κίνησης μη πραγματικού χρόνου. Αυτό επιτυγχάνεται εξασφαλίζοντας ένα τμήμα των συνολικών πόρων για την κίνηση πραγματικού χρόνου. Ακόμα και απουσία χρηστών που αιτούνται κίνηση πραγματικού χρόνου, οι χρήστες υπηρεσιών μη πραγματικού χρόνου μπορούν να χρησιμοποιήσουν μόνο ένα προκαθορισμένο τμήμα των συνολικών πόρων. Αντίθετα, οι χρήστες πραγματικού χρόνου μπορούν να χρησιμοποιήσουν όλο το εύρος ζώνης. Η επιλογή αυτή έχει υϊοθετηθεί κυρίως σε σχήματα που χρησιμοποιούνται σε κυψελωτά δίκτυα για την απόδοση προτεραιότητας στις κλήσεις από διαπομπή από γειτονικά κελιά έναντι των νέων κλήσεων. Στην εργασία [89] μελετάται η επίδοση παρόμοιων αλγορίθμων με προτεραιότητες για κυψελωτά δίκτυα. Τέλος, παρουσιάζεται ένας Τ[°]Π κεντρικά ελεγχόμενος αλγόριθμος ελέγχου αποδοχής κλήσεων, ο οποίος λαμβάνει ως μέτρο QoS τη διέλευση TCP.

4.2 Αλγόριθμος υπολογισμού των πόρων υπό συνθήκες διαλείψεων

Στον προτεινόμενο αλγόριθμο ελέγχου αποδοχής κλήσεων και αντίστοιχα προς με τις περιπτώσεις που θα μελετηθούν, λαμβάνονται υπόψη ως μέτρα QoS το μέγιστο ποσοστό λανθασμένων πακέτων PER ή η διέλευση του πρωτοκόλλου TCP (M). Στόχος είναι η διατήρηση του αντίστοιχου μέτρου επίδοσης κάτω από ένα προκαθορισμένο επίπεδο PER_{th} ή M_{th} , αντίστοιχα, με ταυτόχρονη εξασφάλιση σταθερού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων.

Έστω Ψ_S οι πόροι που απαιτούνται από ένα χρήστη ώστε να ικανοποιήσει υπό συνθήκες καθαρού ουρανού τις απαιτήσεις QoS της ζητούμενης υπηρεσίας. Υπό συνθήκες διαλείψεων απαιτούνται πρόσθετοι πόροι ώστε να αντισταθμίζονται με χρήση ACM ως αντιμέτρου οι δυναμικές μεταβολές του διαύλου που οφείλονται κυρίως στην απόσβεση λόγω βροχής. Οι κατάλληλοι ρυθμοί ACM και, συνεπώς, οι πρόσθετοι πόροι που απαιτούνται για την εξασφάλιση των προδιαγραφών QoS καθόλη τη διάρκεια της σύνδεσης υπολογίζονται με βάση την εκτίμηση της κατάστασης του δορυφορικού διαύλου. Προς τούτο κάθε χρήστης εκτελεί τον ακόλουθο αλγόριθμο υπολογισμού των πόρων:

1. Κάθε χρήστης γνωρίζει τις απαιτήσεις QoS της υπηρεσίας c που θέλει να μεταδώσει (Ψ_S και *PER* ή M_{th}) καθώς και τη διάρκεια της σύνδεσής του T_S .

- 2. Η παράμετρος QoS που χρησιμοποιείται κατά περίπτωση είναι μια γνωστή-αντίστοιχα προς το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται- αύξουσα συνάρτηση της απόσβεσης A, f(A). Η απόσβεση κατά την αρχή της σύνδεσης $t = t_0$ συνδέεται με την παράμετρο QoS (έστω x) μέσω της σχέσης $A(t_0) = f^{-1}(x)$.
- 3. Το επίπεδο απόσβεσης στο τέλος της σύνδεσης, $A(t_0 + T_S)$, εκτιμάται με βάση την πιθανότητα διακοπής P_{out} επιλύοντας την εξίσωση

$$P_{out} = P(A > A(t_0 + T_S) | A(t_0), T_S) = \frac{\int_{A(t_0 + T_S)^-}^{+\infty} \int_{A(t_0)^-}^{A(t_0)^+} f_{A_1A_2}(A_1, A_2; T_S) dA_1 dA_2}{\int_{A(t_0)^-}^{A(t_0)^+} h_{A_1}(A_1) dA_1}$$
(4.1)

Η τυχαία μεταβλητή $A(t_0)$ ακολουθεί τη μονοδιάστατη λογαφιθμοκανονική κατανομή $h_{A_1}(A_1)$, ενώ οι τυχαίες μεταβλητές $A(t_0)$, $A(t_0 + T_S)$ που εμφανίζονται στην (4.1) ακολουθούν την από κοινού δισδιάστατη λογαφιθμοκανονική κατανομή $f_{A_1A_2}(A_1, A_2, \Delta t)$ που οφίζεται στο Παφάφτημα A[116]. Η (4.1) σημαίνει ότι, υποθέτοντας ότι η αφχική απόσβεση κατά τη χφονική στιγμή ($t = t_0$) είναι $A(t_0)$, η απόσβεση μετά από χφόνο T_S υπεφβαίνει το επίπεδο $A(t_0 + T_S)$ με πιθανότητα P_{out} .

4. Μετά την εκτίμηση της στάθμης $A(t_0 + T_S)$, ο απαιτούμενος λόγος ενέργειας ψηφίου προς πυκνότητα ισχύος θορύβου (E_b/N_0) κατά τη χρονική στιγμή $t = t_0 + T_S$ μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί και να προσδιορισθούν οι απαραίτητοι πρόσθετοι πόροι ώστε να διατηρηθεί το μέτρο QoS κάτω από το προκαθορισμένο κατώφλιο. Με βάση τον λόγο (E_b/N_0) μπορεί να προσδιοριστεί ο ρυθμός ACM και, στη συνέχεια, το ποσοστό των πρόσθετων πόρων R(t)που απαιτούνται για τη δυναμική αντιστάθμιση των διαλείψεων.

Τα ποσοστά των πρόσθετων πόρων εκτιμώνται υπό δεδομένη πιθανότητα διακοπής P_{out} που αποτελεί την πιθανότητα ένας χρήστης να τεθεί εκτός λειτουργίας. Αν οι αιτούμενοι πόροι δεν επαρκούν να εγγυηθούν τις απαιτήσεις QoS καθόλη τη διάρκεια της σύνδεσης, ο χρήστης δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί και τίθεται εκτός λειτουργίας.

Για την επεξήγηση της προηγηθείσας ανάλυσης, στο Σχ.4.1 έχει προσομοιωθεί μια τυπική χρονοσειρά για τα κλιματικά χαρακτηριστικά της πόλης της Αθήνας στη συχνότητα f = 30GHz. Τη χρονική στιγμή $t_0 = 25s$ ένας χρήστης εισάγεται στο σύστημα με $A(t_0) = 5dB$


Σχήμα 4.1: Εκτίμηση του επιπέδου απόσβεσης για διαφο
ρετικές τιμές της πιθανότητας $P_{\it out}.$

για διάρκεια σύνδεσης $T_S = 135s$.

To εκτιμώμενο επίπεδο απόσβεσης $A(t_0 + T_S)$ απεικονίζεται για διαφορετικές τιμές της πιθανότητας P_{out} . Είναι φανερό ότι για $P_{out} = 10^{-2}$ και 10^{-1} ο χρήστης υποεκτιμά τις πραγματικές συνθήκες του διαύλου και συνεπώς, οι αιτούμενοι πόροι δεν είναι αρκετοί να αντισταθμίσουν την απόσβεση, προκαλώντας την απόρριψή του από το σύστημα. Για παράδειγμα, στο Σχ.4.1 για $P_{out} = 10^{-1}$ ο χρήστης θα τεθεί εκτός λειτουργίας για 85*sec*, ενώ για $P_{out} = 10^{-2}$ για 10*sec*. Ωστόσο, με τη μείωση του P_{out} το εκτιμώμενο επίπεδο απόσβεσης $A(t_0 + T_S)$ αυξάνεται. Κατεπέκταση, η πιθανότητα η πραγματική απόσβεση να υπερβαίνει το εκτιμώμενο επίπεδο $A(t_0 + T_S)$ μειώνεται. Αυτό φαίνεται και από το Σχ.4.1 όπου για $P_{out} = 10^{-3}$ γίνεται υπερεκτίμηση του επιπέδου απόσβεσης με αποτελέσμα οι πόροι να επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών του χρήστη. Συνεπώς, η πιθανότητα P_{out} συνδέεται με την πιθανότητα υποεκτίμησης των πραγματικών συνθηκών του διαύλου και, με την υπόθεση ότι στο συγκεκριμένο σχήμα οι απαιτήσεις QoS πρέπει να ικανοποιούνται καθόλη τη διάρκεια της σύνδεσης, η πιθανότητα P_{out} λαμβάνεται ίση με την πιθανότητα απόρομης κλήσεων (call dropping probability, P_d). 5. Τέλος, υπό συνθήκες διαλείψεων, οι απαιτήσεις των χρηστών γίνονται

$$\psi(t) = (1 + R(t))\Psi_S \tag{4.2}$$

4.3 Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων: Η Περίπτωση μιας κλάσης υπηρεσιών

Στον προτεινόμενο αλγόριθμο ελέγχου αποδοχής κλήσεων στην περίπτωση μιας κλάσης υπηρεσιών [90], ως μέτρο QoS θεωρείται το PER. Έστω Ψ_S οι πόροι που απαιτούνται από ένα χρήστη για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις QoS της ζητούμενης υπηρεσίας υπό συνθήκες καθαρού ουρανού. Υπό συνθήκες διαλείψεων, οι απαιτήσεις των χρηστών ($\psi(t)$) δίδονται από τη σχέση (4.2).

Υπό συνθήκες καθαφού ουφανού, ένας χφήστης γίνεται δεκτός από το σύστημα εφόσον οι συνολικοί πόφοι που χφησιμοποιούνται από τους υπάφχοντες χφήστες στο σύστημα και αυτοί που αιτείται ο χφήστης δεν υπεφβαίνουν αθφοιστικά τη συνολική χωφητικότητα του συστήματος. Με την υπόθεση ότι κατά τη στιγμή της αίτησης υπάφχουν i χφήστες που εξυπηφετούνται από το δίκτυο, η απαφαίτητη συνθήκη για την αποδοχή του χφήστη i + 1 είναι

$$\Psi_S \le C - i \cdot \Psi_S \tag{4.3}$$

όπου C το συνολικό εύρος ζώνης του δικτύου.

Για την ανάλυση που ακολουθεί γίνεται η υπόθεση ότι ο guθμός αφίξεων των χρηστών είναι διακριτή τυχαία διαδικασία τ.δ. που ακολουθεί την κατανομή Poisson με μέσο guθμό αφίξεων λ και ο χρόνος εξυπηρέτησης είναι τ.δ. εκθετικά κατανεμημένη με μέσο guθμό εξυπηρέτησης μ .

4.3.1 Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες καθαρού ουρανού.

Υπό συνθήκες καθαφού ουφανού και με δεδομένες τις απαιτήσεις της υπηρεσίας που παρέχεται (Ψ_S και *PER*), ο μέγιστος αφιθμός χρηστών, *N*, που μπορούν να υποστηριχθούν από το σύστημα είναι $N = [C/\Psi_S]$, όπου [x] δηλώνει το ακέφαιο τμήμα του x. Έστω $\pi_i(t)$ η πιθανότητα ώστε το σύστημα να βρίσκεται στην κατάσταση i κατά τη χρονική στιγμή t, δηλαδή ότι i χρήστες εξυπηρετούνται από το σύστημα. Οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης της διαδικασίας Markov, π_i , μπορούν να προσδιορισθούν κατά μοναδικό τρόπο με την επεξεργασία των ακόλουθων εξισώσεων

$$\lambda \pi_0 = \mu \pi_1$$

$$\lambda \pi_{N-1} = N \mu \pi_N$$

$$(4.4)$$

$$(\lambda + i\mu) \pi_i = \lambda \pi_{i-1} + (i+1)\mu \pi_{i+1}.$$

Με βάση την ομάδα σχέσεων (4.4) οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης της διαδικασίας Markov προκύπτουν

$$\pi_{i} = \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{i} \pi_{0}, \ \pi_{0} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{i}}, \ i \in [1, ..., N].$$
(4.5)

Υπό συνθήκες καθαρού ουρανού ένας νέος χρήστης δεν γίνεται δεκτός από το σύστημα εφόσον η αλυσίδα Markov, που παριστάνει τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετούνται από το σύστημα, βρίσκεται ήδη στην κατάσταση Ν. Συνεπώς, η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων προκύπτει

$$P_{bl}^{(CS)} = \pi_N = \frac{1}{N!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^N \cdot \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^N \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i}.$$
 (4.6)

4.3.2 Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες διαλείψεων.

Υπό συνθήκες διαλείψεων, υποθέτοντας ότι το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση i και με δεδομένους τους πρόσθετους πόρους του χρήστη i κατά την έναρξη της σύνδεσης $R_i(t_0)$, η πιθανότητα αποδοχής μιας νέας κλήσης είναι

$$P_{i}^{(adm)} = \begin{cases} Pr\{(1 + R_{i+1}(t_{0} + T_{S})) \Psi_{S} \leq C - & \text{av } i \in [1, N - 1] \\ \sum_{j=1}^{i} (1 + R_{j}(t_{0} + T_{S})) \Psi_{S} | R_{1}(t_{0}), \cdots, R_{i+1}(t_{0}) \} \\ Pr\{(1 + R_{1}(t_{0} + T_{S})) \Psi_{S} \leq C | R_{1}(t_{0}) \} & \text{av } i=0. \end{cases}$$

$$(4.7)$$



Σχήμα 4.2: Αλυσίδα Markov για το προτεινόμενο σχήμα αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες διαλείψεων στην περίπτωση μιας κλάσης υπηρεσίας.

Η (4.7) μπορεί να γραφεί και υπό τη μορφή

$$P_{i}^{(adm)} = Pr\left\{\sum_{j=1}^{i+1} R_{j}(t_{0} + T_{S}) \le R_{i}^{(th)} \middle| R_{1}(t_{0}), \cdots, R_{i+1}(t_{0})\right\}$$
(4.8)

όπου

$$R_i^{(th)} = \frac{C}{\Psi_S} - (i+1), \ i \in [0, N-1]$$
(4.9)

είναι το μέγιστο ποσοστό πόρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διόρθωση λαθών από όλους τους χρήστες στην κατάσταση *i*.

Υπό συνθήκες διαλείψεων οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης της διαδικασίας Markov του Σχ.4.2 μπορούν να προσδιορισθούν κατά μοναδικό τρόπο με την επεξεργασία των εξισώσεων

$$\lambda P_{0}^{(adm)} \pi_{0} = \mu \pi_{1}$$

$$\lambda P_{N-1}^{(adm)} \pi_{N-1} = N \mu \pi_{N}$$

$$(4.10)$$

$$(\lambda P_{i}^{(adm)} + i\mu) \pi_{i} = \lambda P_{i-1}^{(adm)} \pi_{i-1} + (i+1)\mu \pi_{i+1}.$$

Οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης στην περίπτωση αυτή προκύπτουν

$$\pi_{i} = \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{i} \left[\prod_{j=0}^{i-1} P_{j}^{(adm)}\right] \pi_{0}, \quad i \in [1, ..., N],$$
(4.11)

όπου

$$\pi_{0} = \left(1 + \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{i} \prod_{j=0}^{i-1} P_{j}^{(adm)}\right]\right)^{-1}.$$
(4.12)

Η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων προκύπτει ως το άθροισμα των πιθανοτήτων υπό τις οποίες

μια νέα κλήση δεν γίνεται δεκτή σε όλες τις καταστάσεις. Συνεπώς

$$P_{bl}^{(R)} = \sum_{i=0}^{N-1} \pi_i \left(1 - P_i^{(adm)} \right) + \pi_N.$$
(4.13)

4.3.3 Άνω όριο μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες διαλείψεων

Ме бебоце́vo то $R_i^{(th)}$, ка́ве хо́потиς µπоде́ va ектиµ́пое́ то аvті́отоіхо ελάχιστο επίπεδο $(E_b/n_0), (E_b/n_0)_i^{(th)}$, που εγγυάται τις аπαιτήσεις QoS [57]. Έτσι n (4.8) µποде́ va γραφεί σε όρους (E_b/n_0) υπό τη μορφή

$$P_i^{(adm)} = Pr\left\{\sum_{j=1}^{i+1} (E_b/n_0)_j (t_0 + T_S) \ge (E_b/n_0)_i^{(th)} \left| (E_b/n_0)_1 (t_0), \dots, (E_b/n_0)_{i+1} (t_0) \right\},$$
(4.14)

όπου $(E_b/n_0)_j(t_0)$ και $(E_b/n_0)_j(t_0 + T_S)$ είναι οι τιμές (E_b/n_0) του χρήστη j στην αρχή και το τέλος της σύνδεσης, αντίστοιχα.

Αν το επίπεδο (E_b/n_0) στην είσοδο του αποκωδικοποιητή του χρήστη j υπό συνθήκες καθαρού ουρανού δηλώνεται με $(E_b/n_0)_j^{(CS)}$, οι προβλεπόμενες τιμές $(E_b/n_0)(t)$ συνδέονται με την προβλεπόμενη απόσβεση λόγω βροχής κάθε χρήστη $A_j(t)$ μέσω της σχέσης

$$A_{j}(t) = (E_{b}/n_{0})_{j}^{(CS)} - (E_{b}/n_{0})_{j}(t), \ \forall t \in [t_{0}, t_{0} + T_{S}].$$

$$(4.15)$$

Με βάση την (4.15), η πιθανότητα αποδοχής κλήσεων γράφεται

$$P_i^{(adm)} = Pr\left\{\sum_{j=1}^{i+1} A_j(t_0 + T_S) \le A_i^{(th)} \middle| A_1(t_0), \cdots, A_{i+1}(t_0)\right\}.$$
(4.16)

Ο αφιθμητικός υπολογισμός της πιθανότητας αποδοχής $P_i^{(adm)}$ είναι δύσκολος, καθώς οι τυχαίες μεταβλητές που πεφιλαμβάνονται στη (4.16) ακολουθούν 2(i + 1)-διάστασης λογαφιθμοκανονική κατανομή. Συνεπώς, αυτό που μποφεί να πφοσδιοφισθεί είναι το άνω όφιο για την πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων υπολογίζοντας το κάτω όφιο της πιθανότητας αποδοχής. Το τελευταίο υπολογίζεται υποθέτοντας, πφώτον, ότι οι χφήστες είναι εγκατεστημένοι πολύ κοντά μεταξύ τους ώστε να θεωφούνται πλήφως συσχετισμένοι ως πφος την απόσβεση λόγω βφοχής και, δεύτεφον,

ότι το $A_i(t_0)$ λαμβάνεται ίσο με το περιθώριο διαλείψεων που υπολογίζεται για συγκεκριμένο επίπεδο διαθεσιμότητας του συστήματος [91]. Στην περίπτωση αυτή, όλοι οι χρήστες υπόκεινται στην ίδια απόσβεση και το κάτω όριο της πιθανότητας αποδοχής προκύπτει

$$\left(P_{i}^{(adm)}\right)_{L} = Pr\left\{R(t_{0} + T_{S}) \le R_{i}^{(th)}/(i+1) \middle| R(t_{0})\right\}$$
(4.17)

Βάσει της ανωτέρω ανάλυσης η (4.17) γράφεται υπό τη μορφή

$$\left(P_{i}^{(adm)}\right)_{L} = Pr\left\{A(t_{0} + T_{S}) \le A_{i}^{(th)} \middle| A(t_{0})\right\}$$
(4.18)

Επομένως

$$\left(P_{i}^{(adm)}\right)_{L} = \frac{\int_{0.5}^{A_{i}^{(th)^{+}}} \int_{A(t_{0})^{-}}^{A(t_{0})^{+}} f_{AA^{0}}(A, A^{0}; T_{S}) dA^{0} dA}{\int_{A(t_{0})^{-}}^{A(t_{0})^{+}} h_{A^{0}}(A^{0}) dA^{0}}$$
(4.19)

Με αντικατάσταση της σχέσης (4.19) στην (4.13) υπολογίζεται το άνω όριο της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων.

4.4 Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων: Η περίπτωση δύο κλάσεων υπηρεσιών

4.4.1 Περιγραφή του σχήματος ελέγχου αποδοχής κλήσεων

Στην περίπτωση αυτή θεωρούνται δύο κλάσεις υπηρεσιών, η υπηρεσία πραγματικού χρόνου (Real Time, RT) και η υπηρεσία μη πραγματικού χρόνου (Non-Real Time, NRT) [92]. Οι χρήστες της υπηρεσίας RT μπορούν να χρησιμοποιήσουν όλο το εύρος ζώνης του συστήματος C, ενώ οι χρήστες της υπηρεσίας NRT μπορούν να χρησιμοποιήσουν μόνο ένα προκαθορισμένο ποσοστό K των συνολικών πόρων. Η λογική βάση του σχήματος αυτού είναι ότι το σύστημα προτιμά να κάνει δεκτούς λιγότερους χρήστες NRT, των οποίων η υπηρεσία παρουσιάζει ανοχή στην καθυστέρηση, προκειμένου να μην απορρίπτει χρήστες RT. Αυτό το σχήμα εξασφαλίζει ότι, ακόμα και αν ένας μεγάλος αριθμός χρηστών NRT κάνει αίτηση αποδοχής στο σύστημα, θα υπάρχουν πάντα (C - K) πόροι διαθέσιμοι για τους χρήστες RT.

Στον προτεινόμενο αλγόριθμο ελέγχου αποδοχής κλήσεων στην περίπτωση δύο κλάσεων υ-

πηρεσιών, το PER θεωρείται ως μέτρο QoS με PER_{th}^c , c = RT, NRT το προκαθορισμένο επίπεδο κάτω από το οποίο πρέπει να διατηρείται το αντίστοιχο PER. Επίσης, έστω Ψ_S^c , c = RT, NRT οι πόροι που απαιτούνται από χρήστες της υπηρεσίας RT και NRT, αντίστοιχα, για να ικανοποιήσουν τις προδιαγραφές QoS της ζητούμενης υπηρεσίας υπό συνθήκες καθαρού ουρανού και R(t), Q(t) το ποσοστό των πρόσθετων πόρων που απαιτούνται για τη δυναμική αντιστάθμιση των διαλείψεων από τους χρήστες της υπηρεσίας RT και NRT, αντίστοιχα. Επομένως, οι απαιτούμενοι πόροι από το χρήστη της c κλάσης (c = RT, NRT) υπό συνθήκες διαλείψεων είναι:

$$\psi^{RT} = \left(1 + R(t)\right) \Psi_S^{RT} \tag{4.20}$$

$$\psi^{NRT} = \left(1 + Q(t)\right) \Psi_{S}^{NRT} \tag{4.21}$$

Υπό συνθήκες καθαφού ουφανού, ένας χφήστης RT γίνεται αποδεκτός από το σύστημα εφόσον οι συνολικοί πόφοι που καταλαμβάνονται από τους υπάρχοντες χφήστες και από το νέο χφήστη δεν υπεφβαίνουν το συνολικό εύφος ζώνης C. Υποθέτοντας ότι υπάρχουν i χφήστες RTκαι j χφήστες NRT που εξυπηφετούνται από το δίκτυο, η απαφαίτητη συνθήκη για την αποδοχή ενός χφήστη RT (i + 1) είναι

$$\Psi_S^{RT} \le C - \left(i\Psi_S^{RT} + j\Psi_S^{NRT}\right) \tag{4.22}$$

Η αντίστοιχη αναγκαία συνθήκη για την αποδοχή ενός χρήστ
η $\mathit{NRT}~(j+1)$ είναι

$$\Psi_S^{NRT} \le K - \left(i\Psi_S^{RT} + j\Psi_S^{NRT}\right) \tag{4.23}$$

Αν κατά τη χρονική στιγμή $t = t_0$ ένας νέος χρήστης RT υπηρεσίας (i + 1) κάνει αίτηση για σύνδεση διάρκειας T_S , λόγω της (4.22) η αποδοχή του από το σύστημα εξασφαλίζεται εφόσον

$$\left(1+R_{i+1}(t)\right)\Psi_{S}^{RT} \leq C - \sum_{k=1}^{i} \left(1+R_{k}(t)\right)\Psi_{S}^{RT} - \sum_{k=1}^{j} \left(1+Q_{k}(t)\right)\Psi_{S}^{NRT}, \quad \forall t \in [t_{0}, t_{0}+T_{S}]$$
(4.24)

Αντίστοιχα βάσει της (4.23)-που εκφράζει την προτεραιότητα των χρηστών της υπηρεσίας RT έναντι των χρηστών της υπηρεσίας NRT- η αναγκαία συνθήκη για την αποδοχή ενός νέου χρήστη (j + 1) της υπηρεσίας NRT είναι

$$\left(1+Q_{j+1}(t)\right)\Psi_{S}^{NRT} \leq K - \sum_{k=1}^{i} \left(1+R_{k}(t)\right)\Psi_{S}^{RT} - \sum_{k=1}^{j} \left(1+Q_{k}(t)\right)\Psi_{S}^{NRT}, \quad \forall t \in [t_{0}, t_{0}+T_{S}]$$
(4.25)

Πρέπει να σημειωθεί ότι για την ανάλυση που θα ακολουθήσει λαμβάνεται υπόψη το χειρότερο σενάριο σύμφωνα με το οποίο η απόσβεση αυξάνει καθόλη τη διάρκεια της σύνδεσης. Σύμφωνα με το σενάριο αυτό, ο μέγιστος αριθμός πρόσθετων πόρων απαιτείται τη χρονική στιγμή $t = t_0 + T_S$. Επίσης, γίνεται η υπόθεση ότι ο ρυθμός αφίξεων των χρηστών ακολουθεί την κατανομή Poisson με μέσο ρυθμό αφίξεων λ_{RT} και λ_{NRT} για υπηρεσίες RT και NRT, αντίστοιχα, και ο χρόνος εξυπηρέτησης είναι εκθετικά κατανεμημένος με μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης μ_{RT} και μ_{NRT} , αντίστοιχα.

4.4.2 Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες καθαρού ουρανού

Υπό συνθήκες καθαρού ουρανού και με δεδομένα τις απαιτήσεις των υπηρεσιών που παρέχονται υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (Ψ_S^{RT} , Ψ_S^{NRT}) και τα απαιτούμενα επίπεδα *PER*, ο μέγιστος αριθμός χρηστών των υπηρεσιών *RT* και *NRT* που μπορούν να υποστηριχθούν από το σύστημα είναι

$$m = \left[C / \Psi_S^{RT} \right] \tag{4.26}$$

$$n = \left[K/\Psi_S^{NRT} \right] \tag{4.27}$$

Στο Σχ.4.3 απεικονίζεται το διάγραμμα μετάβασης για το προτεινόμενο σχήμα μη αποδοχής νέων κλήσεων.

Το διάγραμμα προκύπτει από τη δισδιάστατη αλυσίδα Markov και ο χώρος καταστάσεών της ορίζεται ως

$$S = \{(i, j) | i + aj \le m, \ 0 \le j \le n\},$$
(4.28)

όπου *i* και *j* είναι ο αφιθμός των κλήσεων των υπηφεσιών *RT* και *NRT*, αντίστοιχα, και $a = [\Psi_S^{NRT}/\Psi_S^{RT}]$, παφάμετφος μέσω της οποίας οφίζεται η μοφφή της αλυσίδας Markov του Σχ.4.3. Συγκεκφιμένα, οι πόφοι που απελευθεφώνονται μετά την ολοκλήφωση της εξυπηφέτησης ενός χφήστη υπηφεσίας *NRT* παφέχουν τη δυνατότητα αποδοχής στο σύστημα *a* χφηστών της υπηφεσίας *RT*.

Έστω q(i, j; i', j') η πιθανότητα μετάβασης από την κατάσταση (i, j) στην κατάσταση (i', j').



Σχήμα 4.3: Αλυσίδα Markov δύο διαστάσεων για το προτεινόμενο σχήμα αποδοχής κλήσεων.

Τότε

$$q(i, j; i-1, j) = i\mu_{RT} \qquad (0 < i \le m, \ 0 \le j \le n)$$
(4.29)

$$q(i, j; i+1, j) = \lambda_{RT} \qquad (0 \le i < m, \ 0 \le j \le n)$$
(4.30)

$$q(i, j; i, j-1) = j\mu_{NRT} \qquad (0 \le i \le m, \ 0 < j \le n)$$
(4.31)

$$q(i, j; i, j+1) = \lambda_{NRT} \qquad (0 \le i \le m, \ 0 \le j < n)$$
(4.32)

όπου (i, j) είναι κάποια υπαφκτή κατάσταση στο χώφο καταστάσεων S. Έστω p(i, j) η πιθανότητα μόνιμης κατάστασης (κατάστασης ισοφροπίας) ότι υπάρχουν στο σύστημα i χρήστες υπηρεσίας RT και j χρήστες υπηρεσίας NRT. Από τις εξισώσεις ισοφροπίας του συστήματος προκύπτουν οι πιθανότητες μόνιμης κατάστασης

$$p(i,j) = \frac{\lambda_{RT}^{i}}{i!\mu_{RT}^{i}} \cdot \frac{\lambda_{NRT}^{j}}{j!\mu_{NRT}^{j}} \cdot p(0,0), \ 0 \le j \le n, \ i+aj \le m$$
(4.33)

όπου

$$p(0,0) = \left[\sum_{0 \le j \le n, i+a \le m} \frac{\lambda_{RT}^{i}}{i!\mu_{RT}^{i}} \frac{\lambda_{NRT}^{j}}{j!\mu_{NRT}^{j}}\right]^{-1} = \left[\sum_{j=0}^{n} \frac{\lambda_{NRT}^{j}}{j!\mu_{NRT}^{j}} \sum_{i=0}^{m-a j} \frac{\lambda_{RT}^{i}}{i!\mu_{RT}^{i}}\right]^{-1}$$
(4.34)

Υπό συνθήκες καθαφού ουφανού ένας νέος χρήστης RT δεν γίνεται δεκτός από το σύστημα εφόσον η αλυσίδα Markov βρίσκεται ήδη στις καταστάσεις (m - aj, j), όπου $0 \le j \le n$, δηλαδή στις καταστάσεις που δηλώνουν το τέλος κάθε γραμμής του διαγράμματος μετάβασης. Συνεπώς,

n πιθανότητα μη αποδοχής για χρήστες RT δίδεται από τη σχέση

$$P_{CS}^{RT} = \left[\sum_{j=0}^{n} \frac{\lambda_{RT}^{(m-a_j)}}{(m-a_j)!\mu_{RT}^{(m-a_j)}} \cdot \frac{\lambda_{NRT}^{j}}{j!\mu_{NRT}^{j}}\right] p(0,0)$$
(4.35)

Ομοίως, ένας νέος χρήστης NRT δεν γίνεται αποδεκτός εφόσον η αλυσίδα βρίσκεται στις καταστάσεις που υποδηλώνουν το τέλος κάθε στήλης του διαγράμματος μετάβασης. Συνεπώς, η πιθανότητα μη αποδοχής χρηστών NRT δίδεται από τη σχέση

$$P_{CS}^{NRT} = p(0,0) \left[\sum_{i=0}^{m-an} \frac{\lambda_{RT}^{i}}{+} i! \mu_{RT}^{i} \cdot \frac{\lambda_{NRT}^{n}}{n! \mu_{NRT}^{n}} + \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=m-a(n-k+1)+1}^{m-a(n-k)} \frac{\lambda_{RT}^{i}}{i! \mu_{RT}^{i}} \cdot \frac{\lambda_{NRT}^{(n-k)}}{(n-k)! \mu_{NRT}^{(n-k)}} \right]$$
(4.36)

Επιπλέον, ο μέσος αριθμός χρηστών της υπηρεσίας c (c = RT, NRT) που εξυπηρετούνται από το σύστημα δίνεται από

$$\overline{N}_{CS}^{c} = \sum_{i=0}^{m-an} \sum_{j=0}^{n} hp(i,j) + \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=m-a(n-k+1)+1}^{m-a(n-k)} \sum_{j=0}^{n-k} hp(i,j),$$
(4.37)

όπου

$$h = \begin{cases} i, \quad c = RT \\ j, \quad c = NRT \end{cases}$$
(4.38)

4.4.3 Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες διαλείψεων

Υπό συνθήκες διαλείψεων και λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (4.24) και (4.25), οι πιθανότητες μετάβασης από την κατάσταση (i, j) στην κατάσταση (i', j') γράφονται

$$q(i, j; i-1, j) = i \mu_{RT} \qquad (0 < i \le m, \ 0 \le j \le n)$$
(4.39)

$$q(i, j; i+1, j) = \lambda_{RT} \pi^{RT}(i, j; i+1, j) \quad (0 \le i < m, \ 0 \le j \le n)$$
(4.40)

$$q(i, j; i, j-1) = j \mu_{NRT} \qquad (0 \le i \le m, \ 0 < j \le n)$$
(4.41)

$$q(i, j; i, j+1) = \lambda_{NRT} \pi^{NRT}(i, j; i, j+1) \ (0 \le i \le m, \ 0 \le j < n)$$
(4.42)

Στις ανωτέρω σχέσεις $\pi^{RT}(i, j; i+1, j), \pi^{NRT}(i, j; i, j+1)$ είναι οι πιθανότητες αποδοχής χρηστών

RT, NRT, αντίστοιχα, υποθέτοντας ότι το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση (i, j) υπό δεδομένη πλεονάζουσα πληροφορία-το πρόσθετο ποσοστό πόρων-που απαιτείται κατά την αρχή της σύνδεσης $(t = t_0)$, $R_i(t_0)$, $Q_j(t_0)$, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι τα $R_i(t_0 + T_S)$ και $Q_j(t_0 + T_S)$ δηλώνουν την πλεονάζουσα πληροφορία που απαιτείται κατά τη χρονική στιγμή $t = t_0 + T_S$ από τους χρήστες RT και NRT, αντίστοιχα. Οι πιθανότητες αποδοχής εκφράζονται μέσω των σχέσεων

$$\pi^{RT}(i, j; i+1, j) = Pr\left\{\left(1 + R_{i+1}(t_0 + T_S)\right)\Psi_S^{RT} \le C - \left(\sum_{k=1}^{i} \left(1 + R_k(t_0 + T_S)\right)\Psi_S^{RT} + \sum_{k=1}^{j} \left(1 + Q_k(t_0 + T_S)\right)\Psi_S^{NRT}\right) \right| R_1(t_0), \cdots, R_{i+1}(t_0), Q_1(t_0), \cdots, Q_j(t_0)\right\}$$

$$(4.43)$$

$$\pi^{NRT}(i, j; i, j+1) = Pr\left\{\left(1 + Q_{j+1}(t_0 + T_S)\right)\Psi_S^{NRT} \le K - \left(\sum_{k=1}^i (1 + R_k(t_0 + T_S))\Psi_S^{RT} + \sum_{k=1}^j (1 + Q_k(t_0 + T_S))\Psi_S^{NRT}\right) \middle| R_1(t_0), \cdots, R_i(t_0), Q_1(t_0), \cdots, Q_{j+1}(t_0)\right\}$$

$$(4.44)$$

Η (4.43) μπορεί να επαναδιατυπωθεί υπό τη μορφή

$$\pi^{RT}(i, j; i+1, j) = Pr\left\{\sum_{k=1}^{i+1} R_k(t_0 + T_S) + a \sum_{k=1}^j Q_k(t_0 + T_S) \le R_{(i+1,j)}^{(th)} \\ |R_1(t_0), \cdots, R_{i+1}(t_0), Q_1(t_0), \cdots, Q_j(t_0)\right\}$$
(4.45)

όπου

$$R_{(i+1,j)}^{(th)} = \frac{C}{\Psi_S^{RT}} - \left(i + 1 + aj\right)$$
(4.46)

είναι
η μέγιστη πλεονάζουσα πληφοφοφία που απαιτείται για διόφθωση λαθών στην κατάσταση
 (i + 1, j) όταν ένας νέος χφήστης υπηφεσίας RT γίνεται αποδεκτός από το σύστημα.

Χρησιμοποιώντας την ανωτέρω λογική, η (4.44) επαναδιατυπώνεται υπό τη μορφή

$$\pi^{NRT}(i, j; i, j+1) = Pr\left\{\sum_{k=1}^{i} R_k(t_0 + T_S) + a\sum_{k=1}^{j+1} Q_k(t_0 + T_S) \le Q_{(i,j+1)}^{(th)} \\ |R_1(t_0), \cdots, R_i(t_0), Q_1(t_0), \cdots, Q_{j+1}(t_0)\right\}$$

$$(4.47)$$

όπου

$$Q_{(i,j+1)}^{(th)} = \frac{K}{\Psi_S^{RT}} - \left(i + a(j+1)\right)$$
(4.48)

είναι
 η μέγιστη πλεονάζουσα πληφοφοφία που απαιτείται για διόφθωση λαθών από όλους τους
 χρήστες στην κατάσταση (i, j + 1), δηλαδή στην κατάσταση όπου ένας νέος χρήστης υπη
ρεσίας
 NRT γίνεται αποδεκτός στο σύστημα.

Η διαδικασία αφίξεων-εξυπηρετήσεων απεικονίζεται στο Σχ.4.3. Οι πιθανότητες μόνιμης κατάστασης της αλυσίδας Markov μπορούν να προσδιορισθούν κατά μοναδικό τρόπο χρησιμοποιώντας τη γνωστή από τη βιβλιογραφία τεχνική για επίλυση γεωμετρικών πινάκων [94] με εφαρμογή της οποίας προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση πινάκων

$$\mathbf{p}\mathbf{Q} = \mathbf{0},\tag{4.49}$$

όπου το $\mathbf{p} = [\mathbf{p}_0, \mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_m]$ είναι ένα διάνυσμα γραμμή και κάθε του στοιχείο $\mathbf{p}_i = [p(i, 0), p(i, 1), \dots, p(i, n)]$, $i = 0, 1, \dots, m$ είναι επίσης ένα διάνυσμα γραμμή n + 1 στοιχείων. Ο πίνακας μετάβασης καταστάσεων προκύπτει σύμφωνα με το δισδιάστατο διάγραμμα καταστάσεων του Σχ.4.3. Ο πίνακας \mathbf{Q} είναι ένας σύνθετος τριδιαγώνιος πίνακας της μορφής

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{0} & \mathbf{F}_{0} & 0 & 0 & 0 & . & . \\ \mathbf{B}_{1} & \mathbf{L}_{1} & \mathbf{F}_{1} & 0 & 0 & . & . \\ 0 & \mathbf{B}_{2} & \mathbf{L}_{2} & \mathbf{F}_{2} & 0 & . & . \\ 0 & 0 & \mathbf{B}_{3} & \mathbf{L}_{3} & \mathbf{F}_{3} & . & . \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{B}_{4} & \mathbf{L}_{4} & \mathbf{F}_{4} & . \\ . & . & . & . & . & . & . \end{bmatrix},$$
(4.50)

όπου κάθε μη μηδενικό στοιχείο είναι ένας $(n + 1) \times (n + 1)$ υποπίνακας που δημιουργείται όπως περιγράφεται στην εργασία [94]. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο πίνακας **Q** είναι ένας πίνακας $(m + 1)(n + 1) \times (m + 1)(n + 1)$. Αν και στο Σχ.4.3 εμφανίζονται μόνο οι εφικτές καταστάσεις, στην παρούσα ανάλυση γίνεται η υπόθεση ότι οι μεταβάσεις στις μη εφικτές καταστάσεις αναπαρίστανται με μηδενικά στις αντίστοιχες θέσεις του πίνακα μετάβασης ώστε οι διαστάσεις όλων των υποπινάκων L_i, **B**_i και F_i να είναι $(n + 1) \times (n + 1)$.

Βάσει των αλγορίθμων που περιγράφονται στα [94],
[95], οι πιθανότητες \mathbf{p}_i προκύπτουν μέσω

αναδρομικής σχέσης πινάκων της μορφής

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{p}_0 \mathbf{C}_i, \ i > 0 \tag{4.51}$$

όπου τα C_i και p_0 προκύπτουν από τον αλγόριθμο που περιγράφεται στην εργασία [95].

Υπό συνθήκες διαλείψεων η πιθανότητα μη αποδοχής ενός χρήστη υπηρεσίας *RT* είναι το άθροισμα των πιθανοτήτων να καταστούν πλήρεις όλες οι γραμμές του διαγράμματος καταστάσεων. Επομένως

$$P_{R}^{RT} = \sum_{i=0}^{m-an} \sum_{j=0}^{n} p(i,j) \Big[1 - \pi^{RT}(i,j;i+1,j) \Big] + \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=m-a(n-k+1)+1}^{m-a(n-k)} \sum_{j=0}^{n-k} p(i,j) \Big[1 - \pi^{RT}(i,j;i+1,j) \Big]$$
(4.52)

Αντίστοιχα, η πιθανότητα μη αποδοχής ενός χρήστη NRT υπηρεσίας είναι το άθροισμα των πιθανοτήτων να καταστούν πλήρεις όλες οι στήλες του διαγράμματος καταστάσεων. Επομένως

$$P_{R}^{NRT} = \sum_{i=0}^{m-an} \sum_{j=0}^{n} p(i, j) \Big[1 - \pi^{NRT}(i, j; i, j+1) \Big]$$

+
$$\sum_{k=1}^{n} \sum_{i=m-a(n-k+1)+1}^{m-a(n-k)} \sum_{j=0}^{n-k} p(i, j) \Big[1 - \pi^{NRT}(i, j; i, j+1) \Big]$$
(4.53)

Επίσης, ο μέσος αριθμός χρηστών της υπηρεσίας RT που εξυπηρετούνται από το σύστημα είναι

$$\overline{N}_{R}^{RT} = \sum_{i=0}^{m-an} \sum_{j=0}^{n} ip(i,j) \Big[1 - \pi^{RT}(i,j;i+1,j) \Big] + \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=m-a(n-k+1)+1}^{m-a(n-k)} \sum_{j=0}^{n-k} ip(i,j) \Big[1 - \pi^{RT}(i,j;i+1,j) \Big]$$
(4.54)

ενώ ο μέσος αριθμός χρηστών της υπηρεσίας NRT είναι

$$\overline{N}_{R}^{NRT} = \sum_{i=0}^{m-an} \sum_{j=0}^{n} jp(i,j) \Big[1 - \pi^{NRT}(i,j;i,j+1) \Big] + \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=m-a(n-k+1)+1}^{m-a(n-k)} \sum_{j=0}^{n-k} jp(i,j) \Big[1 - \pi^{NRT}(i,j;i,j+1) \Big]$$
(4.55)

4.4.4 Όρια της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες διαλείψεων

Με δεδομένα τα κατώφλια $R_{(i+1,j)}^{(th)}$ και $Q_{(i,j+1)}^{(th)}$, κάθε χρήστης της υπηρεσίας RT ή NRT μπορεί να εκτιμήσει το αντίστοιχο ελάχιστο επίπεδο λόγου σήματος προς θόρυβο, $(E_b/N_0)_{(i+1,j)}^{RT(th)}$ και $(E_b/N_0)_{(i,j+1)}^{NRT(th)}$, που απαιτείται για την ικανοποίηση των αντίστοιχων απαιτήσεων QoS. Έτσι, οι (4.46) και (4.47) μπορούν να διατυπωθούν σε όρους (E_b/N_0) υπό τη μορφή

$$\pi^{RT}(i, j; i+1, j) = Pr\left\{\sum_{k=1}^{i+1} (E_b/N_0)_k^{RT}(t_0 + T_S) + \sum_{k=1}^{j} (E_b/N_0)_k^{NRT}(t_0 + T_S) \ge (E_b/N_0)_{(i+1,j)}^{RT(th)} \right\}$$

$$(E_b/N_0)_1^{RT}(t_0), \cdots, (E_b/N_0)_{i+1}^{RT}(t_0), (E_b/N_0)_1^{NRT}(t_0), \cdots, (E_b/N_0)_j^{NRT}(t_0)\right\}$$

$$(4.56)$$

$$\pi^{NRT}(i, j; i, j+1) = Pr\left\{\sum_{k=1}^{i} (E_b/N_0)_k^{RT}(t_0+T_S) + +\sum_{k=1}^{j+1} (E_b/N_0)_k^{NRT}(t_0+T_S) \ge (E_b/N_0)_{(i,j+1)}^{NRT(th)}\right\}$$

$$(E_b/N_0)_1^{RT}(t_0), \cdots, (E_b/N_0)_i^{RT}(t_0), (E_b/N_0)_1^{NRT}(t_0), \cdots, (E_b/N_0)_{j+1}^{NRT}(t_0)\right\}$$

$$(4.57)$$

όπου $(E_b/N_0)_k^c(t_0)$ και $(E_b/N_0)_k^c(t_0 + T_S)$, c = RT, NRT, είναι οι τιμές (E_b/N_0) του χρήστη k της υπηρεσίας c στην αρχή (t_0) και στο τέλος της σύνδεσης $(t_0 + T_S)$, αντίστοιχα.

Αν υπό συνθήκες καθαρού ουρανού το επίπεδο (E_b/N_0) στην είσοδο του αποκωδικοποιητή είναι $(E_b/N_0)^{(CS)}$, η μέγιστη απόσβεση, $A_{(i,j)}^{c(th)}$, c = RT, NRT, που μπορεί να είναι ανεκτή από κάθε δέκτη προκύπτει

$$A_{(i,j)}^{c(th)} = (E_b/N_0)^{(CS)} - (E_b/N_0)_{(i,j)}^{c(th)}$$
(4.58)

Στο τέλος της σύνδεσης, το προβλεπόμενο επίπεδο απόσβεσης κάθε χρήστη είναι

$$A_k^{c(t_0+T_S)} = (E_b/N_0)^{(CS)} - (E_b/N_0)_k^c(t_0+T_S)$$
(4.59)

ενώ στην αρχή της σύνδεσης είναι

$$A_k^c(t_0) = (E_b/N_0)^{(CS)} - (E_b/N_0)_k^c(t_0)$$
(4.60)

Λαμβάνοντας υπόψη τις (4.58)-(4.60), οι πιθανότητες αποδοχής γράφονται

$$\pi^{RT}(i, j; i+1, j) = Pr\left\{\sum_{k=1}^{i+1} A_k^{RT}(t_0 + T_S) + \sum_{k=1}^{j} A_k^{NRT}(t_0 + T_S) \le A_{(i+1,j)}^{RT(th)}\right\}$$

$$A_1^{RT}(t_0), \cdots, A_{i+1}^{RT}(t_0), A_1^{NRT}(t_0), \cdots, A_j^{NRT}(t_0)\right\}$$
(4.61)

$$\pi^{NRT}(i, j; i, j+1) = Pr\left\{\sum_{k=1}^{i} A_k^{RT}(t_0 + T_S) + \sum_{k=1}^{j+1} A_k^{NRT}(t_0 + T_S) \le A_{(i,j+1)}^{NRT(th)}\right\}$$

$$A_1^{RT}(t_0), \cdots, A_i^{RT}(t_0), A_1^{NRT}(t_0), \cdots, A_{j+1}^{NRT}(t_0)\right\}$$

$$(4.62)$$

Ο αφιθμητικός υπολογισμός των πιθανοτήτων που πεφιλαμβάνονται στις (4.61) και (4.62) είναι δύσκολος, καθώς οι τυχαίες μεταβλητές που πεφιλαμβάνει ακολουθούν τη 2(i + 1 + j)διάστασης λογαφιθμοκανονική κατανομή. Συνεπώς, μποφούν να πφοσδιοφισθούν μόνο όφια για την πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων. Για το σκοπό αυτό, χφησιμοποιείται το γεγονός ότι ένα ζεύγος χφηστών μποφεί να θεωφηθεί συσχετισμένο ή όχι με βάση την τιμή του χωφικού συντελεστή συσχέτισης ρ_0 .

Το άνω όριο της πιθανότητας αποδοχής λαμβάνεται όταν οι χρήστες είναι εγκατεστημένοι αρκετά μακριά ο ένας από τον άλλο ώστε να μπορούν να θεωρηθούν ασυσχέτιστοι ως προς την απόσβεση λόγω βροχής ($\rho_0 \rightarrow 0$). Επομένως, το άνω όριο του $\pi^{RT}(i, j; i + 1, j)$ δίδεται από τη σχέση

$$\pi_{U}^{RT}(i, j; i+1, j) = \frac{\begin{pmatrix} A_{(i+1,j)}^{RT(th)} - & \\ -\sum_{k=1}^{i} A_{k}^{RT(t_{0}+T_{S})-} \\ & -\sum_{k=1}^{j} A_{k}^{NRT}(t_{0}+T_{S}) \end{pmatrix}^{+}}{\prod_{k=1, c=RT}^{i+1} \prod_{k=1, c=RT}^{j} \prod_{k=1, c=RT}^{A_{k}^{c}(t_{0})^{+}} f_{A_{k}A_{k}^{0}}(A_{k}, A_{k}^{c}(t_{0}); T_{s}) dA_{k}^{0} dA_{k}^{c}} \\ & \prod_{k=1, c=RT}^{i+1} \prod_{k=1, c=RT}^{j} \prod_{k=1, c=RT}^{j} \int_{A_{k}^{RT}(t_{0})^{-}}^{A_{k}^{RT}(t_{0})^{-}} h_{A_{k}}(A_{k}^{RT}) dA_{k}^{RT} \prod_{k=1, A_{k}^{NRT}(t_{0})^{-}}^{j} h_{A_{k}}(A_{k}^{NRT}) dA_{k}^{NRT} \\ & \prod_{k=1, A_{k}^{RT}(t_{0})^{-}}^{i+1} h_{A_{k}}(A_{k}^{RT}) dA_{k}^{RT} \prod_{k=1, A_{k}^{NRT}(t_{0})^{-}}^{j} h_{A_{k}}(A_{k}^{NRT}) dA_{k}^{NRT} \\ & (4.63)$$

Αντίθετα, όταν οι χρήστες είναι εγκατεστημένοι πολύ κοντά μεταξύ τους ($\rho_0 \rightarrow 1$), υπόκεινται

όλοι στην ίδια απόσβεση και χρησιμοποιούν τον ίδιο ρυθμό κώδικα, δηλαδή

$$R(t) = R_1(t) = \dots = R_{i+1}(t), \quad \forall t \in (t_0, t_0 + T_S)$$
(4.64)

$$Q(t) = Q_1(t) = \dots = Q_j(t), \quad \forall t \in (t_0, t_0 + T_S)$$
(4.65)

Αντικαθιστώντας τις (4.64), (4.65) στην (4.45), προκύπτει το κάτω όριο της πιθανότητας αποδοχής

$$\pi_L^{RT}(i,j;i+1,j) = Pr\left\{(i+1)R(t_0+T_S) + a \ j \ Q(t_0+T_S) \le R_{(i+1,j)}^{(th)} \middle| \ R(t_0), \ Q(t_0)\right\}$$
(4.66)

Με βάση την ανωτέρω ανάλυση, η (4.66) γράφεται σε όρους απόσβεσης υπό τη μορφή

$$\pi_L^{RT}(i, j; i+1, j) = Pr\left\{A^{RT}(t_0 + T_S) + A^{NRT}(t_0 + T_S) \le A^{RT(th)}_{(i+1,j)} \middle| A^{RT}(t_0), A^{NRT}(t_0)\right\}$$
(4.67)

Τελικά, το κάτω ό
ριο της πιθανότητας αποδοχής, $\pi_L^{RT}(i,j;i+1,j),$ προκύπτει

$$\pi_{L}^{RT}(i,j;i+1,j) = \frac{\int_{0.5}^{A_{(i+1,j)}^{RT(th)+}} \int_{0.5}^{\left(A_{(i+1,j)}^{RT(th)-} - A^{NRT}(t_0 + T_S)\right)^+} \prod_{c} \int_{A^{c}(t_0)^+}^{A^{c}(t_0)^+} f_{AA_0}(A^{c}, A^{c}(t_0); T_S) dA^{0} dA^{c}}{\int_{A^{RT}(t_0)^-}^{A^{RT}(t_0)^+} \int_{A^{NRT}(t_0)^+}^{A^{NRT}(t_0)^+} h_{A_{NRT}}(A^{NRT}) h_{A_{RT}}(A^{RT}) dA^{NRT} dA^{RT}}$$
(4.68)

Με την ίδια λογική, παρόμοια αποτελέσματα μπορούν να προκύψουν για το άνω και κάτω όριο της πιθανότητας αποδοχής $\pi^{NRT}(i, j; i, j + 1)$. Τελικά, αντικαθιστώντας τις (4.63) και (4.68) στην (4.52) προκύπτουν το άνω και κάτω όριο της πιθανότητας μη αποδοχής της υπηρεσίας RT. Αντίστοιχη διαδικασία μπορεί να γίνει για την υπηρεσία NRT.

4.5 ΤCP Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων

Στο προτεινόμενο σχήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων [96] η διέλευση TCP είναι το μέτρο επίδοσης που δείχνει πόσο καλά συμπεριφέρεται το πρωτόκολλο TCP στο δορυφορικό δίαυλο. Παρόμοια σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσεων TCP προτείνονται στις εργασίες [97], [98] για ασύρματα δίκτυα και δίκτυα HAP (High Altitude Platforms), αντίστοιχα. Για τη διέλευση TCP

χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος σε πακέτα/sec [99]:

$$X = \min\left\{\frac{1}{RTT}\sqrt{\frac{3}{2PER}},\psi\right\}$$
(4.69)

όπου *RTT* το μέσο round-trip time και ψ η μέγιστη διέλευση TCP που μπορεί να επιτευχθεί στη σύνδεση. Υπό συνθήκες καθαρού ουρανού όπου το *PER* είναι χαμηλό, το *X* είναι ίσο με το δεύτερο όρο της σχέσης (4.69), $\psi = M_{th}$. Ωστόσο, υπό συνθήκες διαλείψεων, το *PER* αυξάνει και ο πρώτος όρος του δεξιού σκέλους της σχέσης (4.69) γίνεται μικρότερος από το δεύτερο. Στόχος του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι να διατηρηθεί η διέλευση TCP υψηλότερη του M_{th} . Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο υπολογισμού των πόρων που περιγράφεται στην Παράγραφο 4.2, κάθε χρήστης *i* προσδιορίζει τους κατάλληλους ρυθμούς ACM και, συνεπώς, τους πρόσθετους πόρους $R_i(t)$ που απαιτούνται για να εξασφαλισθούν οι απαιτήσεις QoS. Ανάλογα με το επίπεδο $A(t_0 + T_S)$ -που εκτιμάται με πιθανότητα διακοπής P_{out} σύμφωνα με τον αλγόριθμο-, το ποσοστό των πρόσθετων πόρων $R_i(t)$ που απαιτείται για να εξασφαλισθεί η διέλευση TCP υψηλότερη του επιπέδου M_{th} εκτιμάται με τη βοήθεια του Σχ.4.4. Στο Σχ.4.4, το κλάσμα των πρόσθετων πόρων απεικονίζεται συναρτήσει της απόσβεσης A για διαφορετικές τιμές της διέλευσης TCP. Έτσι, υπό συνθήκες διαλείψεων, οι αιτούμενοι πόροι του χρήστη *i* είναι

$$\psi_i = (1 + R_i(t)) \Psi_S \tag{4.70}$$

4.5.1 Ανάλυση Επίδοσης της Πιθανότητας μη αποδοχής Κλήσεων

Και στην περίπτωση αυτή ένας χρήστης δεν γίνεται δεκτός από το σύστημα αν δεν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι ικανοί να εγγυηθούν τις απαιτήσεις QoS των εξυπηρετουμένων χρηστών και του νέου χρήστη σε όλη τη διάρκεια της σύνδεσης.

Υποθέτοντας ότι υπά
ρχουν i χρήστες στο δίκτυο

 απαραίτητη συνθήκη για την αποδοχή του χρήστ
ηi+1είναι

$$P_{i+1}^{(adm)} = Pr\left\{ \left(1 + R_{i+1}(t_0 + T_S)\right)\Psi_S \le C - \sum_{j=1}^i \left(1 + R_j(t_0 + T_S)\right)\Psi_S \middle| R_1(t_0), \cdots, R_{i+1}(t_0) \right\}$$
(4.71)

όπου C το συνολικό εύρος ζώνης του δικτύου. Υπό συνθήκες καθαρού ουρανού η συνθήκη αποδοχής προκύπτει



Σχήμα 4.4: Κλάσμα πρόσθετων πόρων συναρτήσει της απόσβεσης A για διαφορετικές τιμές του M_{th} .

από την (4.71) για $R_k(t) = 0$, $\forall k \in [1, ..., i + 1]$. Στην περίπτωση αυτή ο μέγιστος αριθμός χρηστών που μπορεί να εξυπηρετηθεί από το σύστημα είναι $N = [S/M_{th}]$.

Χρησιμοποιώντας την ανάλυση του σχήματος στην περίπτωση μιας κλάσης υπηρεσίας που περιγράφεται στην Παράγραφο 4.3 η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες καθαρού ουρανού και υπό συνθήκες διαλείψεων δίδεται από τις σχέσεις (4.6) και (4.13) αντίστοιχα, ενώ το άνω όριο της πιθανότητας μη αποδοχής υπολογίζεται ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται στην Παράγραφο 4.3.3.

4.6 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Για την εκτίμηση της επίδοσης των προτεινόμενων αλγορίθμων ελέγχου αποδοχής κλήσεων γίνεται η υπόθεση ότι η άνω ζεύξη είναι οργανωμένη σε πλαίσια MF-TDMA 4 φερόντων και 128 χρονοσχισμών το καθένα. Η διάρκεια πλαισίου είναι ίση με 26.5 ms έτσι ώστε κάθε χρονοσχισμή να παρέχει ρυθμό μετάδοσης 16 kbps. Επίσης, γίνεται η υπόθεση ότι τα τερματικά εξυπηρετούνται από το δορυφορικό σύστημα του HELLAS-SAT 2G το οποίο είναι εγκατεστημένο στις $39^{o}E$



Σχήμα 4.5: Πιθανότητα μη αποδοχής συναρτήσει του λ/μ , για δύο διακριτούς ρυθμούς μετάδοσης για την περιοχή της Αθήνας, $T_s = 2sec$.

και η συχνότητα λειτουργίας είναι 30GHz.

4.6.1 Περίπτωση μιας κλάσης υπηρεσίας

Η εξάφτηση της πιθανότητας μη αποδοχής από το λ/μ για δύο φυθμούς μετάδοσης (1696 kbps και 1792 kbps) απεικονίζεται στο Σχ.4.5 για την περίπτωση εξυπηρέτησης μιας υπηρεσίας. Όπως αναμενόταν, η πιθανότητα μη αποδοχής αυξάνει με το φορτίο. Τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν όταν παρέχονται υπηρεσίες με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, καθώς στην περίπτωση αυτή οι χρήστες είναι πλέον απαιτητικοί σε εύρος ζώνης.

Στο Σχ.4.6, η πιθανότητα μη αποδοχής σχεδιάζεται ως συνάφτηση της διάφκειας σύνδεσης T_S για τφεις τιμές του λ/μ . Από το σχήμα είναι φανεφό ότι η πιθανότητα μη αποδοχής υπό συνθήκες καθαφού ουφανού $P_{bl}^{(CS)}$ δεν επηφεάζεται από τη διάφκεια σύνδεσης T_S αλλά επηφεάζεται δφαστικά από το λ/μ , αφού η αύξηση του λ/μ πφοκαλεί αύξηση της πιθανότητας μη αποδοχής. Υπό συνθήκες διαλείψεων, ωστόσο, το άνω όφιο της πιθανότητας μη αποδοχής αυξάνεται με τήν αύξηση της διάφκειας σύνδεσης T_S , καθώς το πφοτεινόμενο σχήμα αποδοχής κλήσεων βασίζεται



Σχήμα 4.6: Πιθανότητα μη αποδοχής συνα
ρτήσει του T_S για την περιοχή της Αθήνας,
ρυθμός μετάδοσης=1792kbps

στην εκτίμηση της κατάστασης του δορυφορικού διάυλου. Όταν αυξάνεται η διάρκεια σύνδεσης T_S , οι χρήστες χρησιμοποιούν περισσότερους πρόσθετους πόρους για να διασφαλίσουν την αντιμετώπιση των διαλείψεων.

4.6.2 Περίπτωση δύο κλάσεων υπηρεσιών

Στα αφιθμητικά αποτελέσματα ο φυθμός μετάδοσης λαμβάνεται ίσος με 1024 kbps και 2048 kbps (a = 2) για τις υπηφεσίες RT και NRT αντίστοιχα, ενώ το κατώφλιο του φυθμού απώλειας πακέτων PER_{th}^c (c = RT, NRT) λαμβάνει τις τιμές 10^{-3} και 10^{-6} για τα δύο είδη υπηφεσιών, αντίστοιχα. Η αλυσίδα Μαφκο που πεφιγφάφει το δίκτυο αυτό απεικονίζεται στο Σχ.4.7. Το σύστημα μποφεί να υποστηφίξει μέχφι οχτώ χφήστες της υπηφεσίας RT όταν δεν υπάφχουν χφήστες της υπηφεσίας NRT. Όταν ένας χφήστης NRT εισέφχεται στο σύστημα, ο αφιθμός των χφηστών RTμειώνεται κατά a = 2. Από την άλλη πλευφά, με την υπόθεση ότι $K = 3 \times 2048$ kbps, ο μέγιστος αφιθμός χφηστών NRT που μποφούν να υποστηφιχθούν από το σύστημα πεφιοφίζεται στους τφεις, παφέχοντας τη δυνατότητα σε δύο το πολύ χφήστες RT να εξυπηφετούνται ταυτόχφονα με



Σχήμα 4.7: Αλυσίδα Markov που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή αριθμητικών αποτελεσμάτων.

το μέγιστο αριθμό χρηστών NRT.

Για τον έλεγχο της ακρίβειας του αναλυτικού μοντέλου αναπτύχθηκε προσομοιωτής του σχήματος σε Matlab. Οι παράμετροι A_m , S_a απαραίτητες για τον αναλυτικό υπολογισμό των ορίων της πιθανότητας μη αποδοχής προσδιορίζονται με χρήση της διαδικασίας που περιγράφεται στο Παράφτημα Β. Για τον υπολογισμό του άνω ορίου έγινε η υπόθεση ότι όλοι οι χρήστες είναι εγκατεστημένοι στην περιοχή της Αθήνας ώστε να μπορούν να θεωρηθούν πλήρως συσχετισμένοι ως προς την απόσβεση. Αντίθετα, η εκτίμηση του κάτω ορίου βασίζεται στην υπόθεση ότι οι χρήστες είναι εγκατεστημένοι στις περιοχές που αναφέρονται στον Πιν.4.1, όπου δίδονται οι γεωγραφικές παράμετροι (γεωγραφικό μήκος, γεωγραφικό πλάτος, υψόμετρο). Οι συγκεκριμένες τοποθεσίες έχουν επιλεγεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι χρήστες να θεωρούνται ασυσχέτιστοι. Τέλος, όσον αφορά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, έχει υϊοθετηθεί το μοντέλο φυσικού στρώματος που περιγράφεται στο [100].

Η εξάφτηση της πιθανότητας μη αποδοχής από το φοφτίο κίνησης λ για τις υπηφεσίες *RT* και *NRT* απεικονίζεται στα Σχ.4.8 και 4.9, αντίστοιχα. Όπως φαίνεται και από τα δύο σχήματα, η πιθανότητα μη αποδοχής αυξάνει με το φοφτίο κίνησης. Είναι φανεφό ότι η πιθανότητα μη αποδοχής υπηφεσιών *RT* είναι πολύ μικφότεφη από την πιθανότητα μη αποδοχής υπηφεσιών *NRT*, καθώς οι υπηφεσίες *RT* έχουν πφοτεφαιότητα σε σχέση με τις υπηφεσίες *NRT*. Συγκεκφιμένα, όπως φαίνεται από το Σχ.4.8, για μικφές τιμές του λ^{RT} , η πιθανότητα μη αποδοχής υπηφεσιών *RT* (P^{RT}) είναι σημαντικά μικφότεφη από την πιθανότητα μη αποδοχής υπηφεσιών *NRT* (P^{NRT}). Αυτό οφείλεται τόσο στην υψηλότεφη προτεφαιότητα που δίνεται στις υπηφεσίες *RT* όσο και

Τοποθεσία	γεωγ <i>ξαφικό</i> μήκος	γεωγ <i>ξαφικό</i> πλάτος	υψόμετρο
Άμστερνταμ (χρήστης NRT)	52.3	4.8	10
Αθήνα (χρήστης NRT)	38.0	23.7	20
Βουξέλλες (χοήστης RT)	50.8	4.3	398
Βουδαπέστη (χρήστης RT)	47.5	19	151
Λισσαβώνα (χρήστης NRT)	38.6	-9.0	114
Λονδίνο (χρήστης RT)	51.5	0.1	24
Μόσχα (χρήστης RT)	55.7	37.5	250
Μόναχο (χρήστης RT)	48.1	11.5	509
Παρίσι(χρήστης RT)	48.8	2.3	250
Στοκχόλμη (χρήστης RT)	59.3	18.0	23
Βαρσοβία (χρήστης RT)	48.1	16.3	318

Πίνακας 4.1: Τοποθεσίες των Χρηστών για την εξαγωγή αριθμητικών αποτελεσμάτων.



Σχήμα 4.8: Πιθανότητα μη αποδοχής για τις υπηρεσίες RT και NRT συναρτήσει του λ^{RT} [λ^{NRT} =0.2, $\mu^{RT} = \mu^{NRT} = 1/60$, f=30GHz].



Σχήμα 4.9: Πιθανότητα μη αποδοχής για τις υπηρεσίες RT και NRT συναρτήσει του λ^{NRT} [$(\lambda/\mu)^{RT} = 1/60, \ \mu^{RT} = \mu^{NRT} = 1/60, \ f=30$ GHz].



Σχήμα 4.10: Πιθανότητα μη αποδοχής για τις υπηρεσίες RT και NRT συναρτήσει του T_s $[\lambda^{RT} = 0.1, \ \lambda^{NRT} = 0.2, \ \mu^{RT} = \mu^{NRT} = 1/60, \ f=30 \text{GHz}].$

στη σχετικά υψηλή κίνηση υπηρεσιών NRT. Επιπλέον, όπως φαίνεται και από τα δύο σχήματα η P^{RT} επηρεάζεται πολύ λίγο από το λ καθώς έχουν εκχωρηθεί αρκετοί πόροι στην υπηρεσία RT. Ακόμα, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του άνω ορίου της πιθανότητας μη αποδοχής είναι πολύ κοντά στα θεωρητικά αποτελέσματα. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης υπερεκτιμούν το κάτω όριο της πιθανότητας μη αποδοχής σε σύγκριση με το αναλυτικό μοντέλο. Αυτό συμβαίνει διότι το μοντέλο φυσικού στρώματος που υϊοθετείται στην προσομοίωση υποθέτει συσχέτιση μεταξύ μακρινών χρηστών.

Στο Σχ.4.10, η πιθανότητα μη αποδοχής σχεδιάζεται ως συνάφτηση της διάφκειας σύνδεσης T_S . Όπως αναμενόταν, η πιθανότητα μη αποδοχής δεν επηφεάζεται αισθητά από το T_S . Επιπλέον, ισχύει $P_{CS}^{(NRT)} > P_{CS}^{(RT)}$, αφού πεφισσότεφοι πόφοι έχουν εκχωφηθεί σε υπηφεσίες RT. Υπό συνθήκες διαλείψεων, ωστόσο, τα όφια της πιθανότητας μη αποδοχής και για τις δύο υπηφεσίες αυξάνουν με τη διάφκεια σύνδεσης T_S , καθώς το πφοτεινόμενο σχήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων εξαφτάται από την εκτίμηση της κατάστασης του δοφυφοφικού διαύλου. Επειδή έχει ληφθεί υπόψη το χειφότεφο σενάφιο, σύμφωνα με το οποίο η απόσβεση αυξάνει κατά τη διάφκεια της σύνδεσης, όταν αυξάνεται η διάφκεια T_S οι χρήστες χρησιμοποιούν πεφισσότεφη πλεονάζουσα πληφοφορία για να αντισταθμίσουν την απόσβεση.

Στο Σχ.4.11 απεικονίζεται η επίδραση της συχνότητας λειτουργίας στο άνω όριο της πιθανότητας μη αποδοχής. Για υψηλότερες συχνότητες, το άνω όριο της πιθανότητας μη αποδοχής λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές καθώς η απόσβεση λόγω βροχής επηρεάζεται αρνητικά από τη συχνότητα, χειροτερεύοντας σημαντικά την επίδοση του διαύλου. Επομένως, σε υψηλότερες συχνότητες απαιτούνται πλέον εύρωστα σχήματα κωδικοποίησης για την αντιστάθμιση της πρόσθετης υποβάθμισης του σήματος λόγω της μεγαλύτερης απόσβεσης. Επιπλέον, από το σχήμα φαίνεται ότι τα αναλυτικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σχεδόν συμπίπτουν.

Η εξάρτηση του άνω ορίου της πιθανότητας μη αποδοχής από την πιθανότητα απόρριψης P_d για διάφορες τιμές της διάρκειας σύνδεσης T_S απεικονίζεται στο Σχ.4.12. Για χαμηλότερες τιμές της πιθανότητας απόρριψης P_d η πλεονάζουσα πληροφορία που χρησιμοποιείται για την εξασφάλιση των απαιτήσεων QoS αυξάνεται. Συνεπώς, όταν η πιθανότητα απόρριψης P_d μειώνεται, το άνω όριο της πιθανότητας μη αποδοχής αυξάνεται καθώς οι διαθέσιμοι πόροι για τις μελλοντικές κλήσεις μειώνονται. Επιπλέον, η ανοδική τάση του άνω ορίου της πιθανότητας μη αποδοχής για $T_S = 120s$ είναι μεγαλύτερη σε σχέση με $T_S = 90s$ και 60s λόγω της υψηλότερης



Σχήμα 4.11: Άνω όριο της πιθανότητας μη αποδοχής για τις υπηρεσίες RT και NRT συναρτήσει του λ^{RT} για διάφορες τιμές της συχνότητας [$\lambda^{NRT} = 0.2$, $\mu^{RT} = \mu^{NRT} = 1/60$, f=30 GHz].

απόσβεσης που προβλέπεται από το σενάριο κατά τη διάρκεια της σύνδεσης.

Τέλος, στα Σχ.4.13, 4.14 απεικονίζεται η εξάφτηση του μέσου αφιθμού χρηστών που εξυπηφετεί το σύστημα από τα φορτία κίνησης λ^{RT} και λ^{NRT} , αντίστοιχα. Όπως φαίνεται από το Σχ.4.13, υπό συνθήκες καθαρού ουρανού, καθώς αυξάνεται το λ^{RT} ο μέσος αριθμός χρηστών RTπου μπορεί να υποστηρίξει το σύστημα τείνει στη μέγιστη τιμή που είναι 8, ενώ ο μέσος αριθμός χρηστών NRT τείνει στο 0. Υπό συνθήκες διαλείψεων, ο μέσος αριθμός χρηστών είναι ελαφρώς μικρότερος, καθώς οι χρήστες χρειάζονται πρόσθετους πόρους για να αντισταθμίσουν την εκάστοτε εξασθένηση του διαύλου. Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν από το Σχ.4.14, όπου ο μέσος αριθμός χρηστών των χρηστών NRT τείνει στη μέγιστη τιμή που είναι 3, μετατοπίζοντας την αλυσίδα Markov του Σχ.4.7 προς τις άνω αριστερά καταστάσεις όπως απεικονίζονται στο Σχ.4.7. Με τον τρόπο αυτό περιορίζονται οι χρήστες RT που το σύστημα μπορεί να υποστηρίξει σε δύο (υπό συνθήκες καθαρού ουρανού και ελαφρώς λιγότερους υπό συνθήκες διαλείψεων). Επίσης, στην περίπτωση αυτή, φαίνεται ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ελάχιστα αποκλίνουν από το θεωρητικό μοντέλο. Πρέπει να επισημανθεί η μικρή διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και του θεωρητικού μοντέλου για το κάτω όριο του αριθμού



Σχήμα 4.12: Άνω όριο της πιθανότητας μη αποδοχής για τις υπηρεσίες RT συναρτήσει της πιθανότητας απόρριψης P_d για διάφορες τιμές του T_S [$\lambda^{RT} = 0.1$, f=30 GHz].



Σχήμα 4.13: Μέσος αφιθμός NRT χρηστών συναρτήσει του λ^{RT} [λ^{NRT} =0.2, $\mu^{NRT} = \mu^{RT} = 1/60s$, f=30GHz].



Σχήμα 4.14: Μέσος αριθμός RT χρηστών συναρτήσει του $(\lambda/\mu)^{NRT}$ [λ^{RT} =0.1, $\mu^{NRT} = \mu^{RT} = 1/60s$, f=30GHz].

των χρηστών που οφείλεται στο ότι το μοντέλο φυσικού στρώματος που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση υποθέτει συσχέτιση μεταξύ απομακρυσμένων χρηστών.

Κεφάλαιο 5

Κατανεμημένοι Αλγόριθμοι Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων

5.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια έχει εκδηλωθεί αυξανόμενο ενδιαφέρον για παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Τα δορυφορικά συστήματα είναι τα πλέον κατάλληλα να υποστηρίξουν τις υπηρεσίες αυτού του τύπου εξαιτίας της παγκόσμιας κάλυψης που παρέχουν ιδίως σε απομακρυσμένες και δυσπρόσιτες περιοχές, της εύκολης εγκατάστασης και ανασχεδιασμού τους και κυρίως εξαιτίας του χαρακτηριστικού ότι η υποδομή τους δεν επηρεάζεται από φυσικές καταστροφές.

Για την παφοχή των υπηφεσιών αυτού του τύπου καθοφιστικό φόλο παίζει το χφονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη στιγμή που θα γίνει η αίτηση στο σύστημα για την εκχώφηση πόφων μέχφι και τη στιγμή που το τεφματικό θα αφχίσει να αποστέλλει δεδομένα. Τα πεφισσότεφα από τα σχήματα εκχώφησης πόφων που έχουν πφοταθεί στη διεθνή βιβλιογφαφία κάνουν χφήση κεντφικού ελέγχου, σύμφωνα με τον οποίο το NCC αφού συγκεντφώσει τις αιτήσεις από όλα τα τεφματικά λαμβάνει την απόφαση για την αποδοχή ενός νέου χφήστη και την κατανομή των πόφων. Ωστόσο, οι μεγάλες καθυστεφήσεις κατά τη μετάδοση των δεδομένων και το μεγάλο πλήθος χφηστών που καλείται να εξυπηφετήσει το σύστημα ιδιαίτεφα σε πεφιπτώσεις έκτακτης ανάγκης καθιστά τους κεντφικά ελεγχόμενους αλγοφίθμους ανεπαφκείς για την παφοχή αυτού του τύπου των υπηφεσιών. Οι κατανεμημένοι αλγόριθμοι ελέγχου αποδοχής κλήσεων αποσκοπούν στην παροχή υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης με την άμεση εκχώρηση πόρων στους χρήστες. Σε αντίθεση με τους αντίστοιχους κεντρικά ελεγχόμενους αλγορίθμους, ένας νέος χρήστης γίνεται αποδεκτός από το σύστημα αν υπάρχει συμφωνία όλων των υπαρχόντων χρηστών του συστήματος. Ένας χρήστης δε προβάλλει αντίρρηση στην αποδοχή μιας νέας αίτησης αν κατά τη διάρκεια της δικής του σύνδεσης υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι που να ικανοποιούν τις δικές του απαιτήσεις QoS.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παξουσιάζονται κατανεμημένοι διαστρωματικοί αλγόξιθμοι ελέγχου αποδοχής κλήσεων για δοξυφοξικά δίκτυα επικοινωνιών που ακολουθούν τη στρατηγική πλήξους συμμετοχής. Οι προτεινόμενοι αλγόξιθμοι ακολουθούν την ίδια λογική με τους αντίστοιχους κεντρικά ελεγχόμενους που πεξιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 4, σύμφωνα με τους οποίους η απόφαση κάθε χρήστη για την αποδοχή ή όχι της νέας αίτησης βασίζεται στην εκτίμηση για την κατάσταση του δοξυφοξικού διαύλου που πεξιγράφηκε στην παράγξαφο 4.2. Ωστόσο, η αποδοχή ενός νέου χρήστη βασίζεται στην συμφωνία όλων των χρηστών του συστήματος.

Το πφώτο σχήμα που προτείνεται χρησιμοποιεί τη θεωρία παιγνίων και τα μοντέλα διαπραγματεύσεων του Nash (Nash Bargaining Models) που αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο για τη σχεδίαση ενός αλγορίθμου εκχώρησης πόρων για υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης. Αυτό συμβαίνει διότι πραγματοποιούν την κατανομή των πόρων σε ένα κύκλο του παιγνίου ανεξάρτητα από τον αριθμό των χρηστών στο σύστημα. Συνεπώς, κάθε χρήστης, γνωρίζοντας αμέσως το ποσοστό των πόρων που του αναλογεί μετά την αποδοχή του νέου χρήστη, μπορεί να αποφανθεί αν η εισαγωγή του στο σύστημα έρχεται σε σύγκρουση με την ικανοποίηση των δικών του απαιτήσεων QoS. Τα Μοντέλα Διαπραγματεύσεων Nash έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για ανάθεση εργασιών σε υπολογιστικά συστήματα ([101]-[103]), ανάθεση καναλιών σε συστήματα ορθογωνικής πολλαπλής προσπέλασης διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA) ([105]-[107]) και στον έλεγχο της αποδοχής κλήσεων CAC σε κινητές επικοινωνίες ([108]-[109]), ενώ αλγόριθμος κατανομής των πόρων με βάση τη θεωρία παιγνίων για δορυφορικά δίκτυα επικοινωνιών έχει προταθεί στην εργασία [46].

Το δεύτερο σχήμα που προτείνεται είναι ένα απλό κατανεμημένο σχήμα όπου κάθε χρήστης αποφασίζει αν θα κάνει αποδεκτή την αίτηση ενός νέου χρήστη αν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι για το χρονικό διάστημα κατά το οποίο προβλέπεται να συνυπάρχουν στο σύστημα.

137

5.2 Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων με εφαρμογή της Θεωρίας Παιγνίων

Στα δορυφορικά δίκτυα κάθε χρήστης μπορεί να μπει στο σύστημα και να ζητήσει πόρους σε κυκλική βάση. Στα κλασικά κεντρικά ελεγχόμενα συστήματα το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη στιγμή της αίτησης μέχρι την εκχώρηση των πόρων είναι λίγο μεγαλύτερο από το RTT εξαιτίας του γεγονότος ότι τη διαδικασία ανάθεσης των πόρων τη χειρίζεται το κέντρο ελέγχου. Ωστόσο, σε κατανεμημένα συστήματα όλοι οι χρήστες πρέπει να συμφωνήσουν για τον τρόπο που θα κατανεμηθούν οι δεδομένοι πόροι του συστήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ολοκλήρωση της διαδικασίας να απαιτεί πολλαπλά RTT, χρονικό διάστημα μη αποδεκτό για την παροχή υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης. Το πρόβλημα αυτό γίνεται εντονότερο σε περίπτωση μεγάλου πληθυσμού χρηστών, κατάσταση πιθανή σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Στην περίπτωση αυτή ένα αποδοτικό σχήμα εκχώρησης πόρων πρέπει να ολοκληρώνει τη διαδικασία άμεσα. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα μπορεί να αναζητηθεί στα μοντέλα διαπραγματεύσεων Rubinstein-Ståhl [110], [111]. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το παιχνίδι εκχώρησης πόρων μεταξύ δύο χρηστών με χρήση των μοντέλων διαπραγμάτευσης και η επέκτασή του σε Ν παίκτες. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιεί την κατανομή των πόρων στους χρήστες σε ένα κύκλο του παιγνίου και, στη συνέχεια, κάθε χρήστης γνωρίζοντας αμεσως το ποσοστό των πόρων που του αναλογεί μετά την αποδοχή του νέου χρήστη μπορεί να αποφανθεί αν θα τον κάνει δεκτό κατά τη φάση ελέγχου αποδοχής κλήσεων [112].

5.2.1 Το παίγνιο εκχώρησης πόρων μεταξύ δύο παικτών

Το παίγνιο εκχώρησης πόρων μεταξύ δύο παικτών ανήκει στη γενική κλάση των παιγνίων διαπραγμάτευσης [113], όπου και οι δύο παίκτες πρέπει να συμφωνήσουν σχετικά με τον τρόπο που θα μοιρασθούν μια 'πίτα' μοναδιαίου μεγέθους. Η βασική αρχή στο παίγνιο εκχώρησης πόρων είναι ότι κάθε παίκτης πρέπει είτε να αποδεχθεί την πρόταση που έκανε ο άλλος παίκτης με βάση τις δικές του απαιτήσεις σε πόρους είτε να την απορρίψει κάνοντας ο ίδιος νέα προσφορά. Η αποδοχή της πρότασης του άλλου παίκτη ολοκληρώνει το παιχνίδι, ενώ η απόρριψη το οδηγεί σε επόμενο κύκλο. Χωφίς απώλεια της γενικότητας γίνεται η υπόθεση ότι το παίγνιο ξεκινά με πρόταση από τον παίκτη 1. Έστω x το ποσοστό των συνολικών πόφων που προτείνει ο παίκτης 1 να κρατήσει για τον εαυτό του. Αν ο παίκτης 2 είναι ικανοποιημένος με τους εναπομείναντες 1 – x πόφους το παιχνίδι ολοκληρώνεται. Ωστόσο, αν ο παίκτης 2 απορρίψει την πρόταση του παίκτη 1, πρέπει να προτείνει διαφορετική κατανομή των πόφων στην επόμενη περίοδο. Τότε, αν ο παίκτης 1 αποδεχθεί την πρόταση που έκανε ο παίκτης 2, το παιχνίδι της εκχώρησης πόφων ολοκληρώνεται. Σε περίπτωση όμως που το απορρίψει πρέπει να κάνει νέα πρόταση στην επόμενη περίοδο κ.ο.κ. Είναι σαφές ότι, αν οι δύο παίκτες δεν έχουν κάποιο χρονικό περιορισμό για την ολοκλήφωση του παιχνιδιού, η διαδικασία συντονισμού μπορεί να μην τελειώσει ποτέ και οι παίκτες να μη φθάσουν σε συμφωνία. Για παράδειγμα, αν δύο παίκτες επιθυμούν να κάνουν χρήση της υπηρεσίας μεταφοράς δεδομένων μέσω του πρωτοκόλλου FTP (file transfer protocol) και ενδιαφέρονται να μεγιστοποιήσουν το ομθμό μετάδοσής τους λαμβάνοντας όσο το δυνατόν περισσότερους πόρους η διαδικασία των διαπραγματεύσεων μπορεί να μη τελειώσει ποτέ. Αυτό διότι ενδεχομένως οι δύο χρήστες να μη φθάσουν ποτέ σε συμφωνία αφού η υπηρεσία FTP δεν είναι ευαίσθητη στην καθυστέρηση.

Δεν ισχύει όμως το ίδιο και με τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης. Το βασικό χαρακτηριστικό αυτών των υπηρεσιών είναι ότι υπάρχει ένα στενό χρονικό πλαίσιο μέσα στο οποίο πρέπει να γίνει η μετάδοση των δεδομένων. Αν οι παίκτες δεν φθάσουν σε συμφωνία αμέσως και οι πληροφορίες μεταδοθούν εκτός του χρονικού αυτού πλαισίου το όφελός τους θα είναι μηδενικό. Για παράδειγμα, έστω το σενάριο όπου δύο πλοία βρίσκονται σε έκτακτη ανάγκη και θέλουν να μεταδώσουν ταυτόχρονα. Είναι αδιάφορο αν έλθουν σε συμφωνία αφού έχουν βυθισθεί. Αξίζει να αναφερθεί ότι, όσο καθυστερεί η συμφωνία των παικτών, το χρονικό διάστημα στο οποίο μπορούν να μεταδώσουν πληροφορίες που θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην περίπτωση έκτακτης ανάγκης μειώνεται. Συνεπώς, ακόμη και αν η κατανομή (x, 1 - x) γίνεται αποδεκτή και από τους δύο παίκτες μετά από *i* χρονικές περιόδους, οι πραγματικοί πόροι που θα λάβουν είναι $(\delta^i x, \delta^i (1 - x))$, όπου δ είναι ένας παράγοντας ελάττωσης που εξαρτάται από τη διάρκεια της παρεχόμενης υπηρεσίας. Έστω T_S είναι η διάρκεια του γύρου διαπραγματεύσεων, T_p το χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί σε μία χρονοσχισμή και ϵ είναι το ποσοστό των πόρων που πρέπει να εκχωρηθεί σε ένα χρήστη για χρονικό διάστημα T_S για την ικανοποίηση των απαιτήσεων QoS. Κατά τη διάρκεια του T_S το παίγνιο της εκχώρησης πόρων μεταξύ των παικτών 1 και 2 μπορεί να διεξαχθεί το πολύ $k = [T_p/T_S]$ φορές. Η λογική για τον υπολογισμό του δ μιας υπηρεσίας είναι ότι ακόμα και αν όλοι οι πόροι του συστήματος εκχωρούνται σε ένα χρήστη μετά από kπεριόδους, οι πόροι αυτοί δεν θα επαρκούν για την ικανοποίηση των απαιτήσεων QoS. Μετά από k περιόδους το όφελος είναι δ^k , είναι φανερό ότι $\delta = \sqrt[4]{\epsilon}$. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι, όσο νωρίτερα ένας παίκτης εισέλθει στο παίγνιο, τόσο περισσότερους πόρους θα λάβει και τόση περισσότερη πληροφορία έκτακτης ανάγκης θα μεταδώσει.

Σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, η ισορροπία στο παίγνιο εκχώρησης πόρων μπορεί εύκολα να προσδιορισθεί εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στην εργασία [114]. Συγκεκριμένα, έστω x_M οι μέγιστοι πόροι που μπορεί να λάβει ο παίκτης 1. Στον γύρο 2 του παιγνίου τα κέρδη και των δύο παικτών πολλαπλασιάζονται επί δ^2 . Ως εκ τούτου ο παίκτης 1 μπορεί να λάβει το πολύ $\delta^2 \cdot x_M$. Είναι φανερό ότι στο γύρο 1 οποιαδήποτε προσφορά από τον παίκτη 2 που υπερβαίνει τους πόρους $\delta^2 \cdot x_M$ θα γίνει αποδεκτή. Επειδή την περίοδο 1 τα κέρδη πολλαπλασιάζονται επί δ, ο παίκτης 2 θα λάβει τουλάχιστον $\delta - \delta^2 \cdot x_M$ πόρους. Αν ληφθεί υπόψη η προσφορά του παίκτη 1 στον προηγούμενο γύρο (γύρος 1), ο παίκτης 2 δεν θα αποδεχθεί τίποτα λιγότερο από αυτό που θα ελάμβανε αν το παίγνιο ξεκινούσε στον επόμενο γύρο. Έτσι ο παίκτης 1 θα λάβει το πολύ $1 - (\delta - \delta^2 \cdot x_M)$. Επειδή x_M είναι οι μέγιστοι πόροι που θα μπορούσε να λάβει ο παίκτης 1, ισχύει η ακόλουθη εξίσωση

$$x_M = 1 - (\delta - \delta^2 \cdot x_M) \Longrightarrow x_M = \frac{1}{1 + \delta}$$
(5.1)

Συνεπώς, το παίγνιο εκχώρησης πόρων μεταξύ δύο παικτών που ξεκινά με προσφορά από τον παίκτη 1 έχει μοναδική ισορροπία Nash (Nash Equilibrium) την κατάσταση όπου ο παίκτης 1 παίρνει $1/(1+\delta)$ και ο παίκτης 2 παίρνει $\delta/(1+\delta)$. Ο παίκτης 1 λαμβάνει περισσότερους πόρους λόγω του γεγονότος ότι μπαίνει πρώτος στο παίγνιο. Αυτό συμβαίνει διότι όπως προαναφέρθηκε στην περίπτωση των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης υπάρχει ένα στενό χρονικό πλαίσιο μέσα στο οποίο πρέπει να γίνει η μετάδοση των δεδομένων. Επομένως, όσο νωρίτερα ένας παίκτης εισέλθει στο παίγνιο στην περίπτωση των υπηρεσιών αυτών, τόσο περισσότερους πόρους θα λάβει και τόση περισσότερη πληροφορία έκτακτης ανάγκης θα μεταδώσει μέσα στο στενό αυτό χρονικό πλαίσιο. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε υπηρεσίες με ανοχή στην καθυστέρηση για τις οποίες η τιμή του T_S είναι αδιάφορη το $\delta \rightarrow 1$. Τότε, οι πόροι μοιράζονται εξίσου και στους δύο παίκτες. Η προηγούμενη ανάλυση μπορεί εύκολα να επεκταθεί για παίκτες με διαφορετικούς παράγοντες ελάττωσης, δ_1 και δ_2 . Στην περίπτωση αυτή το παίγνιο κατανομής πόρων μεταξύ δύο παικτών που ξεκινά με προσφορά του παίκτη 1 έχει μοναδική ισορροπία Nash av ο παίκτης 1 λάβει $\frac{1-\delta_2}{1-\delta_1\delta_2}$ και ο παίκτης 2 $\frac{\delta_2(1-\delta_1)}{1-\delta_1\delta_2}$ πόρους [113].

5.2.2 Η ανάγκη ύπαρξης πολλών κλάσεων υπηρεσιών

Στην προηγούμενη ενότητα αναλύθηκε πώς πρέπει να γίνει η εκχώρηση των πόρων μεταξύ δύο παικτών ώστε να επιτευχθεί ευσταθής κατανομή των πόρων. Επεκτείνοντας την ανάλυση αυτή μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι χρήστες που ανήκουν σε διαφορετικές κλάσεις υπηρεσιών δεν πρέπει ποτέ να διεκδικούν τους ίδιους πόρους. Για παράδειγμα, ας θεωρηθούν δύο χρήστες που ανταγωνίζονται για τους ίδιους πόρους και ο πρώτος ενδιαφέρεται να μεταδώσει υπηρεσία με ανοχή στην καθυστέρηση όπως FTP, ενώ ο δεύτερος υπηρεσία ευαίσθητη στην καθυστέρηση όπως VoIP σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Είναι προφανές ότι για υπηρεσίες FTP $\delta_1 \longrightarrow 1$, ενώ για υπηρεσίες VoIP, $\delta_2 \longrightarrow 0$. Στην περίπτωση αυτή, ο παίκτης 1 λαμβάνει όλους τους πόρους $\frac{1-\delta_2}{1-\delta_1\delta_2} \longrightarrow 1$, ενώ ο παίκτης 2 δεν λαμβάνει καθόλου πόρους $\frac{\delta_2(1-\delta_1)}{1-\delta_1\delta_2} \longrightarrow 0$.

Στον προτεινόμενο αλγόριθμο η ανάλυση περιορίζεται σε χρήστες που ανήκουν στην ίδια κλάση υπηρεσιών, υποθέτοντας ότι οι πόροι που εκχωρούνται σε κάθε κλάση είναι εκ των προτέρων γνωστοί στους χρήστες. Το πρόβλημα κατανομής των πόρων μεταξύ διαφορετικών κλάσεων περιγράφεται στην εργασία [74].

5.2.3 Επέκταση σε Ν-παίκτες

To παίγνιο εκχώρησης πόρων στην περίπτωση N παικτών αναλύεται στην περίπτωση όπου όλοι οι παίκτες έχουν κοινό συντελεστή ελάττωσης δ. Τις χρονικές στιγμές $t_1, t_{1+N}, t_{1+2N}, ...,$ ο παίκτης 1 προτείνει την κατανομή των συνολικών πόρων $(x_1, x_2, ..., x_N)$ με $x_i \ge 0$ για κάθε $i \in$ $\{1, ..., N\}$ με $\sum_{i=1}^N x_i = 1$.

Κατά τις χρονικές στιγμές $t_2, t_{2+N}, t_{2+2N}, ...,$ ο παίκτης 2 προτείνει μια άλλη κατανομή. Το ίδιο κάνουν, στη συνέχεια, και οι υπόλοιποι πάικτες ενώ ισχύει $t_1 < t_2 < \cdots < t_N$. Όταν ο παίκτης *i* προτείνει μια συγκεκριμένη κατανομή των πόρων, οι υπόλοιποι παίκτες είτε την αποδέχονται είτε την απορρίπτουν. Αν την αποδεχθούν όλοι ταυτόχρονα, οι πόροι εκχωρούνται με βάση της πρόταση του *i*, διαφορετικά ο παίκτης *i*+1 κάνει μια νέα προσφορά κατά τον επόμενο γύρο του παιγνίου.

Επεκτείνοντας την ανάλυση της προηγούμενης ενότητας μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι η ισορροπία στο παίγνιο εκχώρησης πόρων Ν-παικτών δίδεται από την κατανομή [115]

$$\frac{1-\delta}{1-\delta^N}(1,\delta,\ldots,\delta^{i-1},\ldots,\delta^{N-1})$$
(5.2)

Συγκεκριμένα, έστω ότι σε κάθε περίοδο t < N + 1, n ισορροπία του παίκτη i είναι x_i^t . Στην περίοδο t - 1 μια προσφορά $x' = (x_1', x_2', \dots, x_N')$ γίνεται δεκτή από όλους τους παίκτες εφόσον $x_i' > \delta x_i^t$. Έτσι n βέλτιστη λύση για τον παίκτη t - 1 είναι να προσφέρει τους ελάχιστους πόρους δx_i^t σε κάθε άλλο παίκτη για να μεγιστοποιήσει το κέρδος του. Επομένως ο παίκτης t - 1 θα λάβει τους υπόλοιπους πόρους $1 - \sum_{i=1,//i\neq t-1}^N \delta x_i^t$. Με την υπόθεση ότι οι απαιτήσεις κάθε παίκτη δεν αλλάζουν στο χρόνο $x_i = x_i^1 = x_i^2 = \cdots x_i^{N+1}$ αποδεικνύεται ότι το x_i δίνεται από

$$x_i = \frac{\delta^{i-1}}{1+\delta+\delta^2+\ldots+\delta^{N-1}} = \frac{1-\delta}{1-\delta^N}\delta^{i-1}$$
(5.3)

Είναι φανερό ότι καθώς αυξάνεται το πλήθος των παικτών οι πόροι που λαμβάνει κάθε παίκτης μειώνονται καθώς οι συνολικοί πόροι διαιρούνται σε περισσότερα τμήματα. Επίσης, όσο νωρίτερα ένας παίκτης εισέρχεται στο παίγνιο τόσο περισσότερους πόρους λαμβάνει.

5.2.4 Περιγραφή του αλγορίθμου αποδοχής κλήσεων

Στο παίγνιο εκχώρησης πόρων με Ν-παίκτες η αναλογία πόρων που λαμβάνει κάθε παίκτης $i \in \{1, ..., N\}$ δίδεται από τη σχέση (5.3), όπου ο δείκτης *i* αντιστοιχεί στη σειρά που κάθε χρήστης εισέρχεται στο σύστημα. Μια αίτηση που πραγματοποιείται από ένα νέο παίκτη-τον παίκτη N-γίνεται δεκτή υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχουν επαρκείς πόροι για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις QoS τόσο για του ήδη συνδεδεμένους όσο και για το νέο χρήστη. Αν η αίτηση του νέου χρήστη γίνει δεκτή από όλους τους υπόλοιπους παίκτες, οι συνολικοί πόροι θα διαμοιρασθούν σε περισσότερους χρήστες και οι πόροι που θα λάβει κάθε παίκτης θα μειωθούν σε $\psi_i^{(N+1)} = \frac{1-\delta}{1-\delta^{N+1}}\delta^{i-1}$, όπου i = 1, 2, ..., N.

Ενας χρήστης του συστήματος ί δεν θα προβάλλει αντιρρήσεις στην αποδοχή ενός νέου

παίκτη αν ισχύει η ακόλουθη σχέση

$$\psi_i^{(N+1)} \ge \Psi_S, \ \forall i \in \{1, ..., N\}$$
(5.4)

καθόλη τη διάρκεια της σύνδεσής του. Οι πόροι Ψ_S αντιστοιχούν στους πόρους που ικανοποιούν τια απαιτήσεις QoS για τη δεδομένη υπηρεσία υπό συνθήκες καθαρού ουρανού. Η σχέση (5.4) υποδηλώνει ότι ένας χρήστης θα αποδεχθεί την είσοδο ενός νέου παίκτη και με αντίστοιχη μείωση των πόρων του υπό την προϋπόθεση ότι οι νέοι πόροι που θα του εκχωρηθούν είναι ικανοί να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις QoS σε όλη τη διάρκεια της σύνδεσής του. Αν η σχέση (5.4) ισχύει για όλους τους χρήστες $i \in \{1, ..., N\}$, ο νέος χρήστης γίνεται αποδεκτός από το σύστημα.

Υπό συνθήκες διαλείψεων, πρόσθετοι πόροι απαιτούνται για την αντιστάθμιση της απόσβεσης λόγω βροχής. Στην περίπτωση αυτή οι πρόσθετοι πόροι υπολογίζονται με χρήση της διαδικασίας που περιγράφεται στην παράγραφο 4.2 και οι συνολικές απαιτήσεις του χρήστη iδίδονται από τη σχέση (4.2). Αν τη χρονική στιγμή $t = t_0$ ένας νέος παίκτης κάνει αίτηση εισόδου στο σύστημα και η διάρκεια της υπηρεσίας του είναι T_S , γίνεται δεκτός στο σύστημα εφόσον ισχύει

$$\psi_i^{(N+1)} \ge (1 + R_i(t)) \cdot \Psi_S, \ \forall i \in \{1, ..., N\}, \forall t \in [t_0, t_0 + T_S]$$
(5.5)

Με άλλα λόγια, ο παίκτης *i* θα συμφωνήσει στην είσοδο του νέου παίκτη αν οι διαθέσιμοι πόροι μετά την ανακατανομή είναι τουλάχιστον ίσοι με τις συνολικές του απαιτήσεις.

5.3 Ανάλυση επίδοσης του Αλγορίθμου Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων

Στη συνέχεια, διεφευνάται η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες βφοχής. Για απλότητα υποτίθεται ότι οι αφίξεις των χρηστών ακολουθούν την κατανομή Poisson ενώ η διάφκεια εξυπηφέτησης είναι εκθετικά κατανεμημένη. Ο μέσος χφόνος αφίξεων και ο φυθμός εξυπηφέτησης είναι λ και μ , αντίστοιχα.
5.3.1 Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες καθαρού ουρανού.

Υπό συνθήκες καθαφού ουφανού και με δεδομένες τις απαιτήσεις της υπηρεσίας που παρέχεται (Ψ_S, PER και δ), το μέγιστο πλήθος χρηστών N που μπορεί να εξυπηρετηθεί από το σύστημα προσδιορίζεται από την (5.3). Εστω $\pi_i(t)$ η πιθανότητα το σύστημα να ειναι στην κατάσταση *i* όπου *i* είναι το πλήθος των χρηστών που εξυπηρετούνται από το σύστημα δηλαδή *i* παίκτες μετέχουν στο παίγνιο τη χρονική στιγμή *t*. Υποθέτοντας εργοδικότητα, οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης της διαδικασίας Markov προσδιορίζονται κατά άμεσο τρόπο από τις ακόλουθες εξισώσεις

$$\lambda \pi_{0} = \mu \pi_{1}$$

$$(\lambda + i\mu) \pi_{i} = \lambda \pi_{i-1} + (i+1)\mu \pi_{i+1}, \text{ yra } i = [2, ..., N-1]$$

$$\lambda \pi_{N-1} = N\mu \pi_{N}$$
(5.6)

Με βάση την ομάδα σχέσεων (5.6) οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης της διαδικασίας Markov δίδονται από

$$\pi_i = \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \pi_0 \tag{5.7}$$

όπου

$$\pi_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^N \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i}$$
(5.8)

Υπό συνθήκες καθαρού ουρανού ένας νέος χρήστης δεν γίνεται δεκτός από το σύστημα όταν η αλυσίδα βρίσκεται ήδη στην κατάσταση Ν. Συνεπώς, η πιθανότητα μη αποδοχής προκύπτει

$$P_{bl}^{(CS)} = \pi_N = \frac{1}{N} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^N \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^N \frac{1}{i!} (\frac{\lambda}{\mu})^i}$$
(5.9)

και το μέσο πλήθος χρηστών που μετέχουν στο παίγνιο

$$\overline{N}^{(CS)} = \sum_{i=1}^{N} i \cdot \pi_i \tag{5.10}$$

5.3.2 Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες διαλείψεων.

Υπό συνθήκες διαλείψεων από την εξίσωση (5.5) προκύπτει ότι ένας νέος παίκτης γίνεται δεκτός από το σύστημα εφόσον υπάρχουν επαρκείς πόροι για αυτόν και τους ήδη συνδεδεμένους χρήστες ώστε να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις QoS. Υποθέτοντας ότι το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση i - 1, δηλαδή ότι υπάρχουν i - 1 χρήστες στο σύστημα ($i \in \{1, ..., N\}$) και με γνωστό το ποσοστό πρόσθετων πόρων κάθε χρήστη $k, k \in [1, ..., n]$ κατά την αρχή της σύνδεσης ($t = t_0$), $R_i(t_0)$, η πιθανότητα αποδοχής μιας νέας κλήσης γράφεται

$$P_{i}^{(adm)} = Pr\left\{\left(\psi_{1}^{(i)} \ge (1 + R_{1}(t_{0} + T_{S})) \cdot \Psi_{S}\right) \middle| R_{1}(t_{0}), \dots, \left(\psi_{i}^{(i)} \ge (1 + R_{i}(t_{0} + T_{S})) \cdot \Psi_{S}\right) \middle| R_{i}(t_{0})\right\}, i = 1, \dots, N$$
(5.11)

Η (5.11) μπορεί να ξαναγραφεί υπό τη μορφή

$$P_i^{(adm)} = Pr\left\{\left(R_1(t_0 + T_S) \le R_1^{(th)}(i)\right) \middle| R_1(t_0), \dots, \left(R_i(t_0 + T_S) \le R_i^{(th)}(i)\right) \middle| R_i(t_0)\right\}, i = 1, \dots, N$$
(5.12)

όπου

$$R_k^{(th)}(i) = \frac{\psi_k^{(i)} - \Psi_S}{\Psi_S}, \ k \in [1, .., i]$$
(5.13)

είναι το μέγιστο ποσοστό πόφων που μποφούν να χρησιμοποιηθούν για διόρθωση λαθών από το χρήστη k στην κατάσταση i και $R_k(t_0)$ είναι το ποσοστό των πρόσθετων πόφων που χρησιμοποιούνται από το χρήστη k για διόρθωση λαθών τη χρονική στιγμή $t = t_0$.

Οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης της διαδικασίας Markov προκύπτουν από τη μοναδική λύση του συστήματος

$$\lambda P_{0}^{(adm)} \pi_{0} = \mu \pi_{1}$$

$$\lambda P_{N-1}^{(adm)} \pi_{N-1} = N \mu \pi_{N}$$

$$(\lambda P_{i}^{(adm)} + i\mu) \pi_{i} = \lambda P_{i-1}^{(adm)} \pi_{i-1} + (i+1)\mu \pi_{i+1}, \text{ yra } i = \{2, ..., N-1\}$$
(5.14)

Η λύση για τις πιθανότητες σταθερής κατάστασης στην περίπτωση αυτή προκύπτει

$$\pi_{i} = \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{i} \left[\prod_{j=1}^{i-1} P_{j}^{(adm)}\right] \pi_{0}, \quad i = \{1, ..., N\}$$
(5.15)

όπου

$$\pi_0 = \left(1 + \sum_{i=1}^{N-1} \left[\frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \prod_{j=1}^{i-1} P_j^{(adm)}\right]\right)^{-1}$$
(5.16)

Η πιθανότητα μη αποδοχής προκύπτει ως το άθροισμα των πιθανοτήτων μια νέα κλήση να μη γίνει αποδεκτή σε όλες τις καταστάσεις. Συνεπώς

$$P_{bl}^{(R)} = \sum_{i=1}^{N-1} \pi_i \left(1 - P_i^{(adm)} \right) + \pi_N$$
(5.17)

Ο μέσος αριθμός χρηστών στο σύστημα αντίστοιχα είναι

$$\overline{N}^{(R)} = \sum_{i=1}^{N} i \cdot \pi_i \left(1 - P_i^{(adm)} \right) + N \pi_N$$
(5.18)

5.3.3 Όρια της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων υπό συνθήκες διαλείψεων

Υπό δεδομένο $R_k^{(th)}$ κάθε χρήστης k, k = 1, ..., i, μπορεί να εκτιμήσει τον αντίστοιχο ελάχιστο σηματοθορυβικο λόγο $(E_b/n_0)_k^{(th)}$ που εγγυάται τις αντίστοιχες απαιτήσεις QoS. Τότε, n (5.12) μπορεί να γραφεί σε όρους (E_b/n_0) υπό τη μορφή

$$P_{i}^{(adm)} = Pr\left\{ (E_{b}/n_{0})_{1}(t_{0} + T_{S}) \ge (E_{b}/n_{0})_{1}^{(th)}(i) \left| (E_{b}/n_{0})_{1}(t_{0}), \dots \\ \dots, (E_{b}/n_{0})_{i}(t_{0} + T_{S}) \ge (E_{b}/n_{0})_{i}^{(th)}(i) \left| (E_{b}/n_{0})_{i}(t_{0}) \right\}$$
(5.19)

όπου $(E_b/n_0)_k(t_0)$ και $(E_b/n_0)_k(t_0 + T_S)$ είναι οι προβλεπόμενες στάθμες του λόγου (E_b/n_0) του παίκτη k στην αρχή και το τέλος της σύνδεσης, αντίστοιχα.

Υποθέτοντας ότι υπό συνθήκες καθαφού ουφανού
 η τιμή του (E_b/n_0) στην είσοδο του αποκωδικοποιητή του δέκτη του χρήστη
 kείναι $(E_b/n_0)_k^{(CS)}$, η μέγιστη απόσβεση λόγω βροχής που
μπορεί να αντιμετωπίσει επιτυχώς ο δέκτης χωρίς να υποβαθμισθεί η αντίστοιχη QoS είναι

$$A_k^{(th)}(i) = (E_b/n_0)_k^{(CS)} - (E_b/n_0)_k^{(th)}(i)$$
(5.20)

Στο τέλος της σύνδεσης η προβλεπόμενη απόσβεση λόγω βροχής ισούται με

$$A_k(t_0 + T_S) = (E_b/n_0)_k^{(CS)} - (E_b/n_0)_k(t_0 + T_S)$$
(5.21)

ενώ στην αρχή είναι

$$A_k(t_0) = (E_b/n_0)_k^{(CS)} - (E_b/n_0)_k(t_0)$$
(5.22)

Συνδυάζοντας τις (5.20)-(5.22), η πιθανότητα αποδοχής γράφεται

$$P_i^{(adm)} = Pr\left\{A_1(t_0 + T_S) \le A_1^{(th)}(i) \middle| A_1(t_0), \dots, A_i(t_0 + T_S) \le A_i^{(th)}(i) \middle| A_i(t_0)\right\}$$
(5.23)

Ο αφιθμητικός υπολογισμός της πιθανότητας αποδοχής $P_i^{(adm)}$ είναι δύσκολος καθώς οι τυχαίες μεταβλητές που πεφιλαμβάνονται στην (5.23) ακολουθούν την (i+1)-διάστασης Λογαφιθμοκανονική Κατανομή. Για το λόγο αυτό προσδιορίζονται το άνω και κάτω όφιο της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων.

Το άνω όφιο της πιθανότητας αποδοχής εμφανίζεται όταν οι χφήστες είναι εγκατεστημένοι μακφιά ο ένας από τον άλλο, ώστε να μποφούν να θεωφηθούν ασυσχέτιστοι ως πφος την απόσβεση λόγω βφοχής. Στην πεφίπτωση αυτή, το άνω όφιο της πιθανότητας αποδοχής είναι

$$\left(P_{i}^{(adm)}\right)_{U} = \prod_{k=1}^{i} Pr\left\{A_{k}(t_{0} + T_{S}) \le A_{k}^{(th)}(i)|A_{k}(t_{0})\right\} =$$

$$= \prod_{k=1}^{i} \left[\frac{\int_{0.5}^{A_{k}^{(th)}(i)^{+}} \int_{A_{k}(t_{0})^{-}}^{A_{k}(t_{0})^{+}} f_{A_{k}A_{k}^{0}}(A_{k}, A_{k}^{0}; T_{S})dA_{k}^{0}dA_{k}}{\int_{A_{k}(t_{0})^{-}}^{A_{k}(t_{0})^{+}} h_{A_{k}^{0}}(A_{k}^{0})dA_{k}^{0}}\right]$$

$$(5.24)$$

όπου όλες οι παράμετροι στη σχέση (5.24) ορίζονται στο Παράρτημα Β.

Από την άλλη πλευφά, αν οι χφήστες είναι εγκατεστημένοι πολύ κοντά μεταξύ τους ώστε να θεωφούνται πλήφως συσχετισμένοι ως πφος την απόσβεση λόγω βφοχής, υπόκεινται όλοι στην ίδια απόσβεση $A(t_0) = A_1(t_0) = ... = A_i(t_0)$, $A(t_0 + T_S) = A_1(t_0 + T_S) = ... = A_i(t_0 + T_S)$ Επιπλέον, το $A^{(th)}(i)$ πφέπει να πφοσδιοφισθεί λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις απαιτήσεις του παίκτη *i*, που είναι ο τελευταίος που εισέφχεται στο σύστημα, καθως σύμφωνα με τη λύση του μοντέλου διαπφαγματεύσεων είναι αυτός που λαμβάνει το μικφότεφο ποσοστό των συνολικών πόφων. Επομένως, ισχύει $A^{(th)}(i) = A_i^{(th)}(i)$ και εφόσον ο παίκτης *i* δεχθεί την νέα κατανομή πόφων, όλοι οι υπόλοιποι παίκτες συμφωνούν. Συνεπώς, το κάτω όφιο της πιθανότητας αποδοχής δίδεται από τη σχέση

$$\left(P_{i}^{(adm)}\right)_{L} = Pr\left\{A(t_{0}+T_{S}) \le A^{(th)} \middle| A(t_{0})\right\} = \frac{\int_{0.5}^{A(t_{0})^{+}} \int_{A(t_{0})^{-}}^{A(t_{0})^{+}} f_{AA^{0}}(A, A^{0}; T_{S}) dA^{0} dA}{\int_{A(t_{0})^{-}}^{A(t_{0})^{+}} h_{A^{0}}(A^{0}) dA^{0}}$$
(5.25)

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (5.24) και (5.25) στην (5.17), προσδιορίζονται το κάτω και άνω όριο της πιθανότητας μη αποδοχής κλήσεων, αντίστοιχα. Κατά τον ίδιο τρόπο αντικαθιστώντας τις σχέσεις (5.24) και (5.25) στην (5.18) προσδιορίζονται το άνω και κάτω όριο του μέσου αριθμού χρηστών που υποστηρίζονται από το σύστημα.

5.4 Απλός Κατανεμημένος Αλγόριθμος Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων

Στους κατανεμημένους αλγορίθμους ελέγχου αποδοχής κλήσεων ένας νέος χρήστης γίνεται δεκτός από το σύστημα αν όλοι οι υπάρχοντες χρήστες δεν προβάλλουν καμία αντίρρηση στην αποδοχή του. Υπό συνθήκες καθαρού ουρανού και υπό την υπόθεση ότι υπάρχουν i χρήστες που εξυπηρετούνται από το δίκτυο, ένας χρήστης m δεν θα προβάλλει αντίρρηση στην αποδοχή ενός καινούριου χρήστη i + 1 εφόσον ισχύει η σχέση

$$\Psi_{S} \leq C - \sum_{k=1}^{i} \Psi_{S} \left\{ u(t_{k} + T_{Sk}) - u(t_{k}) \right\}, \ \forall t \in [t_{i+1}, \tau_{m}]$$
(5.26)

όπου

$$\tau_m = \min\{t_{i+1} + T_{Si+1}, t_m + T_{Sm}\}, \qquad (5.27)$$

 t_i είναι
 η χρονική στιγμή εισόδου του χρήστη i στο σύστημα και u(t)
η μοναδιαία βηματική συνάρτηση που ορίζεται από τη σχέση

$$u(t) = \begin{cases} 1 & t \ge 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$
(5.28)

Στην (5.27) το τ_m δηλώνει το χρονικό διάστημα όπου οι χρήστες *m* και *i* + 1 συνυπάρχουν στο σύστημα και, συνεπώς, το διάστημα για το οποίο ο χρήστης *m* ενδιάφέρεται να ελέγξει για να συμφωνήσει ή όχι με την αποδοχή του χρήστη *i*+1. Ένα απλό σενάριο για τον υπολογισμό του τ_m



Σχήμα 5.1: Υπολογισμός του τ_m .

απεικονίζεται στο Σχ.5.1. Στο παφάδειγμα αυτό επειδή η κλήση του χρήστη 1 ολοκληφώνεται πριν από αυτή του χρήστη i + 1, ισχύει $\tau_1 = t_1 + T_{S1}$. Ομοίως, $\tau_2 = t_{i+1} + T_{Si+1}$ λόγω του ότι η εξυπηρέτηση του χρήστη 2 ολοκληφώνεται μετά το χρήστη i + 1. Επομένως, η σχέση (5.26) σημαίνει ότι κάθε χρήστης $m, m \in \{1, ..., i\}$ αποδέχεται ένα νέο χρήστη στο σύστημα εφόσον υπάρχουν αρκετοί πόροι για την ικανοποίηση των απαιτήσεων QoS των χρηστών του συστήματος για το χρονικό διάστημα που οι χρήστες m και i + 1 συνυπάρχουν στο σύστημα. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη ότι ένας χρήστης $k \neq m$ μπορεί να εγκαταλείψει το σύστημα κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος οπότε οι πόροι του θα αποδοθούν εκ νέου στο δίκτυο. Αν η σχέση (5.26) ισχύει για όλους τους χρήστες $m \in \{1, ..., i\}$, ο νέος χρήστης γίνεται δεκτός. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο μέσος ρυθμός αφίξεων και εξυπηρετήσεων δηλώνεται με λ και μ , αντίστοιχα. Οι χρόνοι αφίξεων t_i ακολουθούν την κατανομή Poisson με μέση τιμή λ , ενώ οι διάρκειες σύνδεσης T_{Si} είναι εκθετικά κατανεμημένες με μέση τιμή μ .

Ωστόσο, υπό συνθήκες διαλείψεων πρόσθετοι πόροι απαιτούνται για τη δυναμική αντιστάθμιση των διαλείψεων. Οι πρόσθετοι πόροι στην περίπτωση αυτή υπολογίζονται με χρήση της διαδικασίας που περιγράφεται στην παράγραφο 4.2 και οι συνολικές απαιτήσεις του χρήστη *i*

Τοποθεσία	γεωγραφικό μήκος	γεωγραφικό πλάτος	υψόμετρο
Άμστερνταμ (χρήστης NRT)	52.3	4.8	10
Αθήνα (χρήστης NRT)	38.0	23.7	20
Λισσαβώνα (χρήστης NRT)	38.6	-9.0	114
Λονδίνο (χρήστης RT)	51.5	0.1	24
Μόσχα (χρήστης RT)	55.7	37.5	250

Πίνακας 5.1: Τοποθεσίες των Χρηστών για την εξαγωγή αριθμητικών αποτελεσμάτων.

δίδονται από τη σχέση (4.2). Συνεπώς, ένας νέος χρήστης γίνεται δεκτός εφόσον ισχύει η σχέση

$$\psi_{i+1}(t) \le C - \sum_{k=1}^{i} \psi_k(t) \{ u(t_k + T_{Sk}) - u(t_k) \}, \ \forall t \in [t_{i+1}, \tau_m], \forall m \in [1, \dots, i]$$
(5.29)

Η (5.29) γράφεται και υπό τη μορφή

$$(1+R_{i+1}(t))\Psi_{S} \leq C - \sum_{k=1}^{i} (1+R_{i}(t))\Psi_{S} \{u(t_{k}+T_{Sk}) - u(t_{k})\}, \forall t \in [t_{i+1},\tau_{m}], \ \forall m \in [1,\ldots,i]$$
(5.30)

Δηλαδή, ο χρήστης *m* θα συμφωνήσει στην αποδοχή του νέου χρήστη αν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι για την ικανοποίηση των απαιτήσεων QoS των χρηστών για το χρονικό διάστημα τ_m . Αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο δυναμικού υπολογισμού των πόρων της παραγράφου 4.2, η πιθανότητα απόρριψης προκύπτει ίση με P_{out} .

5.5 Αριθμητικά αποτελέσματα

Για την εκτίμηση της επίδοσης των προτεινομένων σχημάτων εκχώρησης πόρων και αποδοχής κλήσεων γίνεται η υπόθεση ότι η άνω ζεύξη είναι οργανωμένη σε πλαίσια MF-TDMA 4 φερόντων και 128 χρονοσχισμών το καθένα. Η διάρκεια πλαισίου είναι ίση με 26.5 ms έτσι ώστε κάθε χρονοσχισμή να παρέχει ρυθμό μετάδοσης 16 kbps και το RTT = 540ms. Επίσης, γίνεται η υπόθεση ότι τα τερματικά εξυπηρετούνται από το δορυφορικό σύστημα του HELLAS-SAT 2G και η συχνότητα λειτουργίας είναι 30*GHz*.



Σχήμα 5.2: Αριθμός χρονοσχισμών που εκχωρούνται ανά χρήστη.



Σχήμα 5.3: Πλήθος χρηστών που εξυπηρετούνται συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης.

5.5.1 Αλγόριθμος με Χρήση Θεωρίας Παιγνίων

Για τον έλεγχο της ακρίβειας του αναλυτικού μοντέλου αναπτύχθηκε προσομοιωτής του προταθέντος σχήματος σε Matlab. Οι παράμετροι A_m , S_a απαραίτητες για τον αναλυτικό υπολογισμό των ορίων της πιθανότητας μη αποδοχής προσδιορίζονται με χρήση της διαδικασίας που περιγράφεται στο Παράρτημα. Για τον υπολογισμό του άνω ορίου έγινε η υπόθεση ότι όλοι οι χρήστες είναι εγκατεστημένοι στην περιοχή της Αθήνας, έτσι ώστε να μπορούν να θεωρηθούν πλήρως συσχετισμένοι ως προς την απόσβεση λόγω βροχής. Αντίθετα, η εκτίμηση του κάτω ορίου στηρίζεται στην υπόθεση ότι οι χρήστες είναι εγκατεστημένοι ως προς την απόσβεση λόγω βροχής. Αντίθετα, η εκτίμηση του κάτω ορίου στηρίζεται στην υπόθεση ότι οι χρήστες είναι εγκατεστημένοι στον Πιν.5.1, όπου παρέχονται όλα τα γεωγραφικά στοιχεία που αφορούν τις αντίστοιχες δορυφορικές ζεύξεις. Οι συγκεκριμένες τοποθεσίες έχουν επιλεγεί ώστε οι χρήστες να μπορούν να θεωρηθούν πλήρως ασυσχέτιστοι. Τέλος, για την προσομοίωση, έχει υϊοθετηθεί το μοντέλο φυσικού στρώματος που περιγράφεται στο [100].

Στο Σχ.5.2, απεικονίζεται το συνολικό πλήθος των χρονοσχισμών που εκχωρούνται σε κάθε παίκτη για διάφορες τιμές του παράγοντα ελάττωσης δ. Είναι φανερό ότι όσο νωρίτερα ένας παίκτης κάνει την αίτηση τόσο περισσότερους πόρους λαμβάνει. Επιπλέον, για υψηλές τιμές του παράγοντα δ, που αντιστοιχεί σε υπηρεσίες με περισσότερη ανοχή στην καθυστέρηση, οι πόροι του συστήματος κατανέμονται δικαιότερα μεταξύ των χρηστών του συστήματος.

Στο Σχ.5.3, απεικονίζεται το πλήθος των χρηστών που μπορεί να υποστηριχθεί από το δίκτυο για διάφορους ρυθμούς μετάδοσης και διαφορετικές τιμές του δ. Υπό συνθήκες καθαρού ουρανού παρατηρείται ότι για ρυθμό μετάδοσης 16kbps και $\delta = 0.9$, το σύστημα μπορεί να υποστηρίξει έως 38 χρήστες. Ωστόσο, για τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης και $\delta = 0.99$ το πλήθος των χρηστών που μπορούν να υποστηριχθούν αυξάνει σε 181, διότι οι πόροι κατανέμονται δικαιότερα στους χρήστες.

Η επίδραση του παράγοντα ελάττωσης δ στην πιθανότητα μη αποδοχής απεικονίζεται στο Σχ.5.4. Καθώς το δ αυξάνει, η πιθανότητα μη αποδοχής ελαττώνεται διότι οι πόροι κατανέμονται δικαιότερα. Στην περίπτωση αυτή, το πλήθος των χρηστών που υποστηρίζεται από το σύστημα αυξάνει και το $P_{bl}^{(CS)}$ ελαττώνεται. Επιπλέον, υπό συνθήκες διαλείψεων, και τα δύο όρια της πιθανότητας μη αποδοχής $P_{bl}^{(R)}$ είναι μεγαλύτερα από την αντίστοιχη πιθανότητα $P_{bl}^{(CS)}$. Αυτό συμβαίνει διότι οι χρήστες κάνουν χρήση πλέον εύρωστων σχημάτων κωδικοποίησης για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις QoS των υπηρεσιών τους. Ακόμα, τα αποτελέσματα της



Σχήμα 5.4: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων συναρτήσει του παράγοντα δ υπό συνθήκες καθαρού ουρανού και υπό συνθήκες διαλείψεων, ρυθμός μετάδοσης = 1024kbps, $\lambda/\mu = 0.5, T_s = 1sec.$

προσομοίωσης του άνω ορίου της πιθανότητας μη αποδοχής είναι πολύ κοντά στα θεωρητικά αποτελέσματα. Ωστόσο, για το κάτω όριο τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δίνουν μια υπερεκτιμημένη τιμή της πιθανότητας μη αποδοχής σε σύγκριση με το αναλυτικό μοντέλο. Αυτό συμβαίνει διότι το μοντέλο φυσικού στρώματος που υϊοθετείται στην προσομοίωση υποθέτει συσχέτιση μεταξύ μακρινών χρηστών.

Στο Σχ.5.5, η πιθανότητα μη αποδοχής σχεδιάζεται ως συνάφτηση της διάφκειας σύνδεσης T_S για δύο τιμές του λ/μ . Παρατηρείται ότι η πιθανότητα μη αποδοχής υπό συνθήκες καθαρού ουρανού δεν επηρεάζεται από το T_S αλλά, αντίθετα, επηρεάζεται σημαντικά από το λ/μ . Ωστόσο, υπό συνθήκες διαλείψεων τόσο το άνω όσο και το κάτω όριο της πιθανότητας μη αποδοχής αυξάνει με το T_S . Αυτό οφείλεται στο ότι το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου αποδοχής κλήσεων εξαρτάται από την εκτίμηση της κατάστασης του δορυφορικού διαύλου. Επειδή έχει θεωρηθεί το χειρότερο σενάριο κατά το οποίο η απόσβεση αυξάνει κατά τη διάρκεια της σύνδεσης, όταν αυξάνεται το T_S οι χρήστες χρησιμοποιούν περισσότερη πλεονάζουσα πληροφορία για να αντισταθμίσουν την αναμενόμενη αυξημένη απόσβεση. Επίσης, τα αριθμητικά αποτελέσματα είναι πολύ κοντά στα αποτελέσματα της προσομοίωσης.



Σχήμα 5.5: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων συνα
ρτήσει της διάρκειας T_s υπό συνθήκες καθαρού ουρανού και υπό συνθήκες διαλείψεων (
ρυθμός μετάδοσης=1024kbps, $\delta = 0.9$).



Σχήμα 5.6: Πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων συνα
ρτήσει του λ/μ για δύο διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης υπό συνθήκες καθαρού ου
ρανού και υπό συνθήκες διαλείψεων, $T_S = 10sec, \delta = 0.8$



Σχήμα 5.7: Μέσος αριθμός χρηστών συναρτήσει του παράγοντα δ ($T_s = 10 sec$, $\lambda/\mu = 10$, ρυθμός μετάδοσης=1024kbps).



Σχήμα 5.8: Μέσος αριθμός χρηστών συναρτήσει του λ/μ , υπό συνθήκες καθαρού ουρανού και υπό συνθήκες διαλείψεων ($T_s = 60 sec$, $\delta = 0.8$, ρυθμός μετάδοσης=1024kbps).

Η εξάφτηση της πιθανότητας μη αποδοχής από το λ/μ για τους φυθμούς μετάδοσης 1024 kbps και 2048 kbps παφουσιάζεται στο Σχ.5.6. Παφατηφείται ότι η πιθανότητα μη αποδοχής κλήσεων αυξάνει με την αύξηση είτε του φοφτίου είτε του φυθμού μετάδοσης, διότι και στις δύο πεφιπτώσεις οι χφήστες απαιτούν πεφισσότεφους πόφους. Επιπλέον, το άνω και κάτω όφιο της πιθανότητας μη αποδοχής υπό συνθήκες διαλείψεων βφίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους, ενώ για υψηλούς φυθμούς μετάδοσης ή υψηλές τιμές του λ/μ ταυτίζονται. Αυτό συμβαίνει διότι η επίδφαση των συνθηκών του διαύλου στην πιθανότητα μη αποδοχής είναι μικφής σημασίας σε σχέση με την αντίστοιχη επίδφαση του φυθμού μετάδοσης ή του λ/μ .

Η επίδραση του παφάγοντα ελάττωσης δ στο μέσο πλήθος των χρηστών που εξυπηρετούνται από το σύστημα, \overline{N} , απεικονίζεται στο Σχ.5.7. Από το σχήμα φαίνεται ότι η αύξηση του παφάγοντα δ οδηγεί σε αύξηση του μέσου πλήθους χρηστών, διότι στην πεφίπτωση αυτή οι πόφοι μοιφάζονται πιο δίκαια. Επιπλέον, υπό συνθήκες διαλείψεων και τα δύο όφια του μέσου πλήθους χρηστών $\overline{N}^{(R)}$ είναι μεγαλύτερα από το αντίστοιχο $\overline{N}^{(CS)}$. Αυτό συμβαίνει διότι οι χφήστες κάνουν χρήση πλέον εύφωστων σχημάτων κωδικοποίησης για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις QoS των υπηρεσιών τους. Τέλος, η επίδραση του λ/μ στο μέσο πλήθος των χρηστών που εξυπηφετούνται από το σύστημα παφουσιάζεται στο Σχ.5.8 για φυθμό μετάδοσης 1024 kbps. Η αύξηση του λ/μ οδηγεί σε αύξηση του μέσου αφιθμού χρηστών που μποφούν να υποστηφιχθούν. Στα σχήματα αυτά, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του άνω οφίου του μέσου αφιθμού χρηστών είναι πολύ κοντά στα θεωφητικά αποτελέσματα. Ωστόσο, για το κάτω όφιο τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποδίδουν μια υπεφεκτιμημένη τιμή του μέσου αφιθμού χρηστών σε σύγκριση με το αναλυτικό μοντέλο. Αυτό συμβαίνει διότι το μοντέλο φυσικού στφώματος που υϊοθετείται στην προσομοίωση υποθέτει συσχέτιση μεταξύ μακοινών χρηστών.

5.5.2 Απλός Κατανεμημένος Αλγόριθμος

Στο Σχ.5.9 απεικονίζεται η εξάφτηση του κανονικοποιημένου αφιθμού μη αποδεκτών κλήσεων (λόγος του μέσου αφιθμού μη αποδεκτών κλήσεων πφος τις συνολικές αφίξεις) από το λ/μ για τους φυθμούς μετάδοσης 1696 kbps και 1792 kbps για την πεφίπτωση του απλού κατανεμημένου αλγοφίθμου. Ο κανονικοποιημένος αφιθμός μη αποδεκτών κλήσεων αυξάνει είτε με το φοφτίο είτε με το φυθμό μετάδοσης διότι αυξάνουν οι απαιτήσεις των χρηστών σε πόφους.



Σχήμα 5.9: Κανονικοποιημένος αριθμός μη αποδεκτών κλήσεων συναρτήσει του λ/μ για την περιοχή της Αθήνας ($P_{out} = 10^{-4}$, f=20GHz, $PER_{th} = 10^{-3}$).



Σχήμα 5.10: Κανονικοποιημένος αριθμός μη αποδεκτών κλήσεων συναρτήσει του $1/\mu$ για την περιοχή της Αθήνας ($P_{out} = 10^{-4}$, f=28GHz), $PER_{th} = 10^{-3}$.

Στο Σχ. 5.10 απεικονίζεται ο κανονικοποιημένος αριθμός μη αποδεκτών κλήσεων συναρτήσει του $1/\mu$ για τρεις τιμές του λ/μ . Ο κανονικοποιημένος αριθμός χρηστών επηρεάζεται ελάχιστα από το $1/\mu$, ενώ αυξάνει σημαντικά με την αύξηση του λ/μ . Υπό συνθήκες διαλείψεων ο κανονικοποιημένος αριθμός μη αποδεκτών κλήσεων αυξάνει με το $1/\mu$, διότι το προτεινόμενο σχήμα εξαρτάται από την εκτίμηση της απόσβεσης του δορυφορικού διαύλου. Όταν αυξάνεται το $1/\mu$ οι χρήστες χρησιμοποιούν περισσότερους πρόσθετους πόρους για να εξασφαλίσουν την αντιστάθμιση της απόσβεσης μέσω πλέον εύρωστης κωδικοποίησης.

Παράρτημα

Α. Λογαριθμοκανονική Κατανομή

Α1.Μονοδιάστατη

Έστω τ.μ. X που ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους m_x και S_x (μέση τιμή και τυπική απόκλιση της τ.μ. αντίστοιχα). Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τ.μ. X δίνεται από τη σχέση [118]

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_x x} exp\left(-\frac{(lnx - m_x)^2}{2S_x^2}\right)$$
(A-1)

Η μέση τιμή της τ.μ. X^n , όπου
 nπραγματικός αριθμός είναι [119]

$$E\left[X^{n}\right] = \exp\left(nm_{x} + \frac{n^{2}S_{x}^{2}}{2}\right)$$
(A-2)

Οι παράμετροι m_x και S_x μπορούν να εκφρασθούν συναρτήσει της μέσης τιμής $\mu_x = E[X]$ και της τυπικής απόκλισης σ_x της τ.μ. X με χρήση των σχέσεων

$$m_x = \ln\left(\frac{\mu_x}{\left(1 + (\sigma_x/\mu_x)^2\right)^{1/2}}\right)$$
 (A-3)

$$S_x^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2}\right) \tag{A-4}$$

Με ολοκλήρωση της σχέσης (Α-1) και χρήση του ορισμού της συμπληρωματικής συνάρτησης σφάλματος προκύπτει

$$\Pr\{X \ge x\} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\ln x - m_x}{\sqrt{2}S_x}\right)$$
(A-5)

όπου

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\pi} \int_{x}^{\infty} e^{-z^2} dz$$
 (A-6)

είναι η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος.

Α2.Δισδιάστατη

Έστω δύο τ.μ. Q_1 και Q_2 που ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή με επιμέρους παραμέτρους m_x και S_{X_i} , (i = 1, 2) με συντελεστή συσχέτισης ρ. Ορίζονται οι ανίστοιχες κανονικοποιημένες ανηγμένες τ.μ. U_1 και U_2 μέσω του μετασχηματισμού

$$U_{i} = \frac{\ln X_{i} - m_{x_{i}}}{S_{x_{i}}}, \quad (i = 1, 2)$$
(A-7)

Καθεμία από τις ανηγμένες τ.μ. ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση 1. Εάν ρ_n είναι ο συντελεστής συσχέτισης των τ.μ. U_1 και U_2 , η από κοινού κατανομή αυτών είναι κανονική και έχει τη μορφή [118]

$$f_{U_1U_2}(u_1, u_2) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_n^2}} \exp\left(-\frac{1}{2\left(1-\rho_n^2\right)}\left(u_1^2 + u_2^2 - 2\rho_n u_1 u_2\right)\right)$$
(A-8)

Από την (Α-8) προκύπτει
η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των Q_1 κα
ι Q_2 με χρήση του μετασχηματισμού της (Α.7). Η αθροιστική πιθανότητα υπέρβασης της τιμής ξ
προκύπτει

$$\Pr\{X_1 \ge x, X_2 \ge x\} = \Pr\{U_1 \ge u, U_2 \ge u\} = \int_u^\infty \int_u^\infty f_{U_1 U_2}(u_1, u_2) \, \mathrm{d}u_1 \mathrm{d}u_2 \tag{A-9}$$

Εφαρμόζοντας το θεώρημα του Bayes προκύπτει

$$f_{U_1U_2}(u_1, u_2) = f_{U_1}(u_1) f_{U_2|U_1}(u_1, u_2) = f_{U_2}(u_2) f_{U_1|U_2}(u_1, u_2)$$
(A-10)

όπου

$$f_{U_1|U_2}(u_1, u_2) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_n^2}} \exp\left(-\frac{(u_1-\rho_n u_2)^2}{2\left(1-\rho_n^2\right)}\right)$$
(A-11)

και

$$f_{U_2}(u_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u_2^2}{2}\right)$$
(A-12)

Αντικατάσταση των σχέσεων (Α-10), (Α-11) και (Α-12) στην (Α-9) οδηγεί στην τελική έκφραση

$$\Pr\{U_1 \ge u, U_2 \ge u\} = \frac{1}{2} \int_{u}^{\infty} f_{U_2}(u_2) \operatorname{erfc}\left(\frac{u - \rho_n u_2}{\sqrt{2\left(1 - \rho_n^2\right)}}\right) du_2$$
(A-13)

Ο υπολογισμός της από κοινού πιθανότητας δυο κανονικών τ.μ. που μεταβάλλονται σε διαφορετικά διαστήματα προκύπτει από τη σχέση

$$\Pr \{a \le U_1 \le b, c \le U_2 \le d\} = \int_a^b f_{U_1}(u_1) \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{c - \rho_n u_1}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{d - \rho_n u_1}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}} \right) \right] du_1 =$$

$$= \int_c^d f_{U_2}(u_2) \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{a - \rho_n u_2}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{b - \rho_n u_2}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}} \right) \right]$$
(A-14)

Β. Δυναμικά χαρακτηριστικά απόσβεσης

Η απόσβεση λόγω βροχής μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας τη δισδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος βροχόπτωσης σε ένα δορυφορικό δίαυλο, ο στιγμιαίος ρυθμός βροχόπτωσης R(mm/h) θεωρείται ως τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή [116]

$$f(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}R} exp\left[-\left(\frac{lnR-m}{\sigma}\right)^2\right]$$
(B-1)

Στη σχέση (B-1), οι παράμετροι (m, σ) είναι οι στατιστικές παράμετροι της λογαριθμοκανονικής κατανομής του στιγμαίου ρυθμού βροχόπτωσης και εκτιμώνται με βάση τους χάρτες βροχόπτωσης της ITU-R [117].

Για τη μοντελοποίηση των δυναμικών μεταβολών του δορυφορικού διαύλου και την εκτίμηση του επιπέδου απόσβεσης $A(T_0 + T_S)$, υιοθετείται η μοντελοποίηση Markov για τη στατιστική διάρκεια των διαλείψεων που περιγράφεται στην εργασία [116]. Θεωρείται αλυσίδα Markov διακριτού χρόνου-διακριτής φάσης X(n) για την αναπαράσταση των διακεκριμένων τιμών της απόσβεσης λόγω βροχής σε ένα χώρο M-καταστάσεων =1, 2, ..., MdB. Η εξέλιξη του X(n) περιγράφεται πλήρως από τον πίνακα μετάβασης **P**, με στοιχεία P_{kl} , $k, l \in$, τα οποία αναπαριστούν την πιθανότητα μετάβασης από μια στάθμη απόσβεσης $A_1 = k \ dB$ σε μια άλλη στάθμη $A_2 = l \ dB$ μετά από χρονικό διάστημα T_S . Οι πιθανότητες μετάβασης ορίζονται από

$$P_{kl} = P(X(n+1) = l|X(n) = k), \quad k, l \in$$
(B-2)

Гічетан п опо́дебп оті та хдочіка́ отічµ
и́ $t = t_0$ а адобіда Магкоч βдібкетан отач ката́отаба k, бадаба́ $A(t_0) \in [A_k^-, A_k^+]$ о́по
υ $A_k^- = k - 0.5$ кан $A_k^+ = k + 0.5$. Στόχος είναι
 а ектіµпоп таς ката́отабаς l τ
ας αλοσίδας Markov με πιθανότατα P_{out} , δαλαδά τ
ας στάθµας απόσβεσας τα χρονικά στιγµ
ά t_0+T_S ώστε $A(t_0+T_S) \in [A_l^-, A_l^+]$. Χρησιµοποιώντας ταν παραπάνω µοντελοποί
αστοίαση έχουµε

$$P_{out} = P\{X(n+1) > l | X(n) = k, T_S\} = \sum_{q=l+1}^{M} P_{k,q}$$

$$= \sum_{q=l+1}^{M} \frac{\int_{A_{q}^{-}}^{A_{q}^{+}} \int_{A_{k}^{-}}^{A_{k}^{+}} f_{A_{q}A_{k}}(A_{q}, A_{k}, T_{S}) dA_{q} dA_{k}}{\int_{A_{k}^{-}}^{A_{k}^{+}} h_{A_{k}}(A_{k}) dA_{k}}$$
$$= \frac{\int_{A_{q}^{-}}^{A_{m}^{+}} \int_{A_{k}^{-}}^{A_{k}^{+}} f_{A_{q}A_{k}}(A_{q}, A_{k}, T_{S}) dA_{q} dA_{k}}{\int_{A_{k}^{-}}^{A_{k}^{+}} h_{A_{k}}(A_{k}) dA_{k}}$$
(B-3)

όπου $h_{A_k}(A_k)$ η μονοδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους A_m και S_a . Λεπτομέρειες για τον υπολογισμό των παραπάνω μεταβλητών καθώς και παραδείγματα εφαρμογής τους σε δορυφορικά δίκτυα μπορούν να βρεθούν στις εργασίες [120]-[128].

Βιβλιογραφία

- [1] B. R. Elbert, "The Satellite Communication Aplications Handbook", Artech House Inc., 1997.
- [2] S.L.Kota, "Quality of Service for Broadband Satellite Internet-ATM and IP services", Academic Dissertation, Faculty of Technology, University of Oulu, Jan.2003
- [3] Le-Ngoc, "Switching for IP-based multimedia satellite communications", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.22, no.3, pp.462- 471, Apr.2004.
- [4] ETSI, Digital Video Broadcasting (DVB), "Framing Structure, Channel Coding and Modulation for the 11/12 GHz Satellite Services", ETSI EN 300 421.
- [5] M. Cominetti, A.Morello, "Digital video broadcasting over satellite (DVB-S): a system for broadcasting and contribution applications", *Int. J. Satell. Commun. Network.*, vol.18, pp.393-410, 2000.
- [6] ETSI, Digital Video Broadcasting (DVB), "Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications", ETSI EN 302 307 (DVB-S2).
- [7] A.Morello, U.Reimers, "DVB-S2, the second generation standard for satellite broadcasting and unicasting", *Int. J. Satell. Commun. Network.*, vol.22, pp.249-268, 2004.
- [8] R.Rinaldo, M.A.Vazquez-Castro, A.Morello, "DVB-S2 ACM modes for IP and MPEG unicast applications", *Int. J. Satell. Commun. Network.*, vol.22, no.3, pp.367-399, 2004.
- [9] M.A.Vazquez-Castro, A.Cardoso, R.Rinaldo, "Encapsulation and framing efficiency of DVB-S2 satellite systems", *in Proc. of Veh. Techn. Conf., VTC 2004*, Milan, Italy, May 2004
- [10] ETSI, Digital Video Broadcasting (DVB), "Interaction Channel for Satellite Distribution Systems", ETSI EN 301 790, 2000.
- [11] ETSI, Digital Video Broadcasting (DVB), "Interaction Channel for Satellite Distribution Systems; Guidelines for the use of EN 301 790", ETSI TR 101 790, 2001.
- [12] H. Skinnemoen, R. Leirvik, J. Hetland, H. Fanebust and V. Paxal, "Interactive IP-network via satellite DVB-RCS", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.22, no.3, pp.508-517, Apr.2004.
- [13] I.F. Akylidiz, S. H. Jeong, "Satellite ATM Networks: A Survey", IEEE Commun. Mag., vol.35, no.7, pp.30-43, Jul.1997.
- [14] A.D. Panagopoulos, P.-D.M. Arapoglou, and P.G. Cottis, "Satellite Communications at Ku, Ka, and V Bands: Propagation Impairments and Mitigation Techniques", *IEEE Commun. Surveys* and Tutorials, vol.6, no.3, 3rd Quarter 2004.

- [15] P. Barsocchi, N.Celandroni, F.Davoli, E.Ferro, G.Giambene, F.J.G.Castano, A.Gotta, J.I.Moreno, P.Todorova, "Radio resource management across multiple protocol layers in satellite networks: A tutorial overview", *Int. J. Satell. Commun. Network.*, vol.23, no.5, pp.265-305, Nov.2005.
- [16] R. Bolla, N. Celandroni, F. Davoli, E. Ferro, M. Marchese, "Bandwidth Allocation in a Multiservice Satellite Network Based on Long-Term Weather Forecast Scenarios", *Computer Commun.*, Special Issue on Advances in Performance Evaluation of Computer and Telecommunications Networking, vol.25, no.11, pp.1037-1046, July 2002.
- [17] J.-M. Park, U. Savagaonkar, E. K. P. Chong, H. J. Siegel, and S. D. Jones, "Allocation of QoS connections in MF-TDMA satellite systems: A two-phase approach", *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol.54, no.1, pp.177-190, Jan.2005.
- [18] P.Todorova, S.Olariu, H.N.Nguyen, "A two-cell-lookahead call admission and handoff management scheme for multimedia LEO satellite networks", in Proc. of 36th Hawaii International Conf. on System Sciences(HICSS-36), Big Island, Hawaii, Jan. 2003.
- [19] F.Chiti, R. Fantacci, F. Marangoni, "Advanced Dynamic Resource Alocation schemes for satellite Systems", *in Proc. IEEE Int. Conf. on Commun.,ICC 2005*, Seoul, Korea, May 2005
- [20] F.Chiti, R.Fantacci, D.Tarchi, S.Kota, T.Pecorella, "QoS provisioning in GEO satellite with onboard processing using predictor algorithms", *IEEE Wirel. Commun.*, vol.12, no.5, pp. 21- 27, Oct.2005
- [21] Z. Jiang and V.C.M. Leung, "A predictive demand assignment multiple access protocol for internet access over broadband satellite networks", *Int. J. Sat. Commun. Netw.* vol.21, no.4-5, pp.451-467.
- [22] P.Koutsakis, "Predictive Resource Reservation Access for Multimedia Integration over GEO Satellite networks", in Proc. Int. Conf. on Wirel. and Mob. Commun., ICWMC 2007, Guadeloupe, French Caribbean, Mar. 2007
- [23] P. Koutsakis, "On providing dynamic resource allocation based on multimedia traffic prediction in satellite systems", *Comp. Commun.*, vol.30, no.2, pp.404-415, Jan. 2007
- [24] T. Le-Ngoc, I.M. Jahangir, "Performance analysis of CFDAMA-PB protocol for packet satellite communication", *IEEE Trans. Commun.*, vol.46, no.9, pp.1206-1214, Sep.1998.
- [25] A.Iuoras, P.Takats, C.Black, R.DiGirolamo, E.A.Wibowo, J.Lambadaris and M.Devetsikiotis, "Quality of service-oriented protocols for resource management in packet-switched satellites", *Int. J. Sat. Commun. Netw.*, vol.17, no.2-3, pp.129-141, Sep.1999.
- [26] L.Chisci, R.Fantacci, F.Francioli, T.Pecorella, "Dynamic Bandwidth Allocation via Distributed Predictive Control in Satellite Networks", in Proc. Int. Symposium on Control, Communications and Signal Processing 2004, Hammamet, Tunisia, Mar.2004.
- [27] L.Chisci, R.Fantacci, T.Pecorella, "Predictive Bandwidth Control for GEO Satellite Networks", *in Proc. of IEEE Int. Conf. on Commun. (ICC 2004)*, Paris, France, June 2004.
- [28] L.Chisci, R.Fantacci, T.Pecorella, "Strategies for Distributed Bandwidth Control in Communication Networks with High Bandwidth Delay Product", *in Proc. of the 43rd IEEE Conf. on Decision and Control*, Atlantis, Paradise Island, Bahamas, Dec. 2004.

- [29] L.Chisci, T.Pecorella, R.Fantacci, "Dynamic Bandwidth Allocation in GEO Satellite Networks: a Predictive Control Approach", *Control Engineering Practice*, vol. 14, no. 9, pp. 1057-1067, Sept. 2006.
- [30] S.Bracciali, R.Fantacci, T.Pecorella, L.Chisci, M.A.V.Castro, "Proactive vs. Reactive DVB-RCS Terminal Using ACM Techniques", in Proc. of IEEE Int. Conf. on Commun. (ICC '08), Beijing, China, May 2008.
- [31] A. Iera, A. Molinaro, S. Marano, "Traffic management techniques to face the effects of intrinsic delays in geostationary satellite networks", *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol.1, no.1, pp.145-155, Jan.2002.
- [32] H. Skinnemoen, A. Vermesan et al, "VoIP over DVB-RCS with QoS and Bandwidth on Demand", *IEEE Wirel. Commun.*, vol.12, no.5, pp.46-53, Oct.2005
- [33] M.Kalama, G.Acar, B.G.Evans, S.Mourgues, "VoIP over DVB-RCS Satellite Systems: A novel Capacity Request Mechanism for improved Voice Activity Detection", in Proc. IEEE Veh. Techn. Conf., VTC 2008, Marina Bay, Singapore, May 2008.
- [34] K.-D.Lee, Y.-H. Cho, H.-J.Lee, D.-G.Oh, "Improving Efficiency of Timeslot Assignment for non-real time data in a DVB-RCS return link: Modeling and Algorithm", *ETRI J.*, vol.25, no.4, pp.211-218, Aug.2003
- [35] K.-D. Lee, H.-J. Lee, Y.-H. Cho, and D.G.Oh, "Throughput-maximizing timeslot scheduling for interactive satellite multiclass services", *IEEE Commun. Lett.*, vol.7, no.6, pp.263-265, Jun.2003.
- [36] K.-D. Lee and K.-N. Chang, "A real-time algorithm for timeslot assignment in multirate return channels of interactive satellite multimedia networks", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.22, no.3, pp.518-528, Apr.2004.
- [37] I.S.Lee, C.S.Sung, G.J.Jin, K.S.Han, "A Real-Time Algorithm for Timeslot Assignment in ISM System with DVB-RCS", *ETRI J.*, vol.29, no.3, pp.329-335, Jun.2007.
- [38] D.Kim, D.-H.Park, K.-D.Lee, H.-J. Lee, "Minimum Length Transmission Scheduling of Return Channels for Multicode MF-TDMA Satellite Interactive Terminals", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.54, no.5, pp.1854-1862, Sep.2005
- [39] G.Açar, C. Rosenberg, "Weighted Fair Bandwidth-on-Demand (WFBoD) for Geostationary Satellite Networks with On-Board Processing", *Computer Networks*, vol.39, no.1, pp.5-20, 2002.
- [40] A.Girard, C.Rosenberg, M.Khemiri, "Fairness and aggregation: A primal decomposition study", in Proc. of European Commission Int. Conf., ser. Lecture Notes in Computer Science, vol.1815. Springer, 2000, pp.667-678.
- [41] A. Morell, G. Seco-Granados, and M. Vàquez-Castro, "Joint Time Slot Optimization and Fair Bandwidth Allocation for DVB-RCS Systems", *in Proc. IEEE Globecom 2006*, San Francisco, California, USA, Nov. 2006.
- [42] A. Morell, G. Seco-Granados and M.A. Vázquez-Castro, "Enhanced Dynamic Resource Allocation for DVB-RCS: a Cross-Layer Operational Framework", *in Proc. IEEE MILCOM 2007*, Orlando, USA, Oct. 2007
- [43] G. Seco-Granados and M.A. Vázquez-Castro, A. Morell, F. Vieira, "Algorithm for Fair Bandwidth Allocation with QoS Constraints in DVB-S2/RCS", in Proc. IEEE Globecom 2006, San Francisco, California, USA, Nov. 2006.

- [44] A. Morell, G. Seco-Granados and M.A. Vázquez-Castro, "Computationally Efficient Cross-Layer Algorithm for Fair Dynamic Bandwidth Allocation", in Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Commun. and Networks (ICCCN), Honolulu, USA, Aug. 2007.
- [45] H. Yaiche, R.R.Mazumdar, C.Rosenberg, "A game theoretic framework for bandwidth allocation and pricing in broadband networks", *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol.8, no.5, pp.667-678, Oct.2000.
- [46] E.Del Re, G.Gorni, L.S.Ronga, M.A. Vázquez-Castro, "A Game Theory Approach for DVB-RCS Resource Allocation", in Proc. IEEE Veh. Techn. Conf., VTC 2008, Marina Bay, Singapore, May 2008
- [47] M. Neely, E. Modiano, and C. Rohrs, "Power Allocation and Routing in Multi-Beam Satellites with Time Varying Channels", *IEEE/ACM Trans.Netw.*, vol. 11, no. 1, pp.138-152, Feb. 2003.
- [48] J. P. Choi and V. W. S. Chan, "Optimum multibeam satellite downlink power allocation based on traffic demands" *in Proc. IEEE GLOBECOM 2002*, Taipei, Taiwan, Nov.2002.
- [49] J. P. Choi and V. W. S. Chan, "Optimum Power and Beam Allocation Based on Traffic Demands and Channel Conditions Over Satellite Downlinks", *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol.4, no.6, pp.2983-2993, Nov.2005
- [50] D.P. Connors, B. Ryu, S. Dao, "Modeling and Simulation of Broadband Satellite Networks Part I: Medium Access Control for QoS Provisioning", *IEEE Commun. Mag.*, vol.37, no.3, pp.72-79, Mar.1999.
- [51] N. Celandroni, F. Davoli, E. Ferro, "Static and Dynamic Resource Allocation in a Multiservice Satellite Network with Fading", *Int. J. Sat. Commun. Netw., Special Issue on Satellite IP Quality* of Service, vol.21, no.4-5, pp.469-487, July-Oct. 2003.
- [52] N. Celandroni, F. Davoli, E. Ferro, A. Gotta, "Adaptive Cross-layer Bandwidth Allocation in a Rain-faded Satellite Environment", *Int. J. Commun. Syst.*, vol.19, no.5, pp.509-530, June 2006.
- [53] F. Davoli, M. Marchese, M. Mongelli, "Optimal Resource Allocation in Satellite Networks: Certainty Equivalent Approach Versus Sensitivity Estimation Algorithms", Int. J. Commun. Syst., vol.18, no.1, pp.3-36, Feb. 2005.
- [54] F. Davoli, M. Marchese, M. Mongelli, "Discrete Stochastic Programming by Infinitesimal Perturbation Analysis: the case of Resource Allocation in Satellite Networks with Fading", *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol.5, no.9, pp.2312-2316, Sep. 2006.
- [55] N.Celandroni, F.Davoli, E.Ferro, A.Gotta, "Networking with Multi-Service GEO Satellites: Cross-Layer Approaches for Bandwidth Allocation", *Int. J. Satell. Commun. Network.*, vol.24, no.5, pp.387-403, Sep.2006.
- [56] G.Giambene, S.Kota, "Cross-layer protocol optimization for satellite communications networks: A survey", *Int. J. Sat. Commun. Netw.*, vol.24, no.5, pp.323-341, Sep.2006.
- [57] F.Alagoz, D.Walters, A.AlRustamani, B.Vojcic, R.Pickholtz, "Adaptive rate control and QoS provisioning in direct broadcast satellite networks", ACM Wirel. Netw., vol.7, no.3, pp.269-281, May 2001.
- [58] F.Alagoz, B.Vojcic, D.Walters, A.AlRustamani, R.Pickholtz, "Fixed Versus Adaptive Admission Control in Direct Broadcast Satellite Networks With Return Channel Systems", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.22, no.2, pp.238-249, Feb.2004.

- [59] A.Aroumont, J.Radzik, M.Bousquet, L.Castanet, "DVB-RCS Return link Radio Resource Management for Broadband Satellite Systems using Fade Mitigation Techniques at Ka band", in IEEE Int. Workshop on Sat. and Space Commun., IWSSC 2008, Toulouse, France, Oct.2008.
- [60] E. Noussi, B. Gremont, M. Filip, "Integration of Fade Mitigation Technique within centrally managed MF-TDMA networks", Special Issue on advances in Sat. Net. Protocols and Performances, Int. J. Space Commun. (full manuscript accepted by the editorial board), available on demand by the authors
- [61] M.A. Vázquez-Castro and G. Seco-Granados, "Cross-Layer Packet Scheduler Design of a Multibeam Broadband Satellite System with Adaptive Coding and Modulation", *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol.6, no.1, pp.248-258, Jan.2007.
- [62] N.Celandroni, E.Ferro, N.James and F.Potorti, "FODA-IBEA-TDMA:A flexible countermeasure system for integrated services in user oriented networks", *Int. J. Sat. Commun. Netw.*, vol.10, no.6, pp.309-323, 1992.
- [63] N.Celandroni, E.Ferro, F.Potorti, "DRIFS-TDMA: A proposal for a satellite access Distributedcontrol Algorithm for multimedia traffic in a faded envirinment", *Int. J. Sat. Commun. Netw.*, vol.15, no.5, pp.227-235, 1997.
- [64] N.Celandroni, E.Ferro, F.Potorti, "FEEDERS-TDMA: A Distributed-control Algorithm for satellite channel capacity assignment in a mixed traffic and faded environment", Int. J. Sat. Commun. Netw., vol.15, no.4, pp.185-195, 1997
- [65] N.Celandroni, E. Ferro, F. Potorti, "Comparison between distributed and centralised demand assignment TDMA satellite access schemes", *Int. J. Sat. Commun. Netw.*, vol.14, no.2, pp.95-111, 1996.
- [66] D.K. Petraki, M.P Anastasopoulos, A.D. Panagopoulos and P.G. Cottis, "Dynamic Resource Calculation Policy in MF-TDMA Satellite Networks", *in proc. of MOBILE SUMMIT '07*, Budapest, July 2007
- [67] D.K.Petraki, M.P. Anastasopoulos and P.G. Cottis, "Dynamic Resource Allocation in DVB-RCS Networks", *Int. J. Sat. Commun. Netw.*, vol.26, no.3, pp.189-210, 2008.
- [68] N. Celandroni, F. Potorti, S. Rizzo, "An inexpensive rain fade countermeasure technique for DA-TDMA satellite systems", *in proc. of GLOBECOM* 96, 1996.
- [69] M. R. Garey, and D. S. Johnson, "Computers and intractability: a guide to the theory of NP completeness", San Francisco, W.H. Freeman and Company, 1979.
- [70] W.M. Shvodian, "Multiple priority distributed round robin MAC protocol for satellite ATM", *in Proc. of Mil. Commun. Conf.*, Bedford, M, USA, Oct.1998.
- [71] D. S. Johnson, A. Demers, J. D. Ullman, M. R. Garey, and R. L. Grahm, "Worst-case performance bounds for simple one-dimensional packing algorithms", SIAM J. Comput., vol.3, pp.299-325, 1974
- [72] E. G. Coffman Jr., K. So, M. Hofri, and A. C. Yao, "A stochastic model of bin-packing", *Inform. Control*, vol.44, pp.105-115, 1980.
- [73] K. W. Ross, "Multiservice Loss Models for Broadband Telecommunication Networks", *Springer-Verlag*, London, 1995.

- [74] M. H. Ahmed, "Call Admission Control in Wireless Networks: a Comprehensive Survey", IEEE Commun. Surveys & Tutorials, vol. 7, No. 1, pp. 50-69, First Quarter 2005
- [75] M.Ghaderi, R.Boutaba, "Call admission control in mobile cellular networks: a comprehensive survey", *Wirel. Commun. Mob. Comp.*, vol.6, no.1, pp.69-93, Feb.2003.
- [76] S.Ramseier, A.Ephremides, "Admission control schemes for spot-beam satellite networks", J. *High Speed Networks*, vol.5, no.1, pp.73-86, 1996.
- [77] K.Wong, N.D. Georganas, "Strategies for optimal capacity allocations for optimal capacity allocations in DAMA satellite communication systems", *in Proc. Data Commun. Symp.*, 1985.
- [78] Yi Qian, Rise Hu, Hosame Abu-Amara, P. Maveddat, "Connection admission control for high capacity multimedia satellite communication system", *in Proc. of Globecom '99*, Rio de Janeiro, Brazil, Dec.1999.
- [79] Yi Qian, Rise Hu, Hosame Abu-Amara, P. Maveddat, "Effect of uplink multiple access scheme on traffic reshaping for abroadband GEO satellite network", *in Proc. WCNC '99*, New Orleans, LA, USA, 1999.
- [80] J. Wieselthier and A. Ephremides, "Fixed and movable-boundary schemes for integrated voice/data wireless networks", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, pp. 64•74, Jan. 1995.
- [81] N.Celandroni, F.Davoli, E.Ferro, A.Gotta, "Adaptive cross-layer bandwidth allocation in a rain-faded satellite environment", *Int. J. of Commun. Syst.*, vol. 19, no. 5, pp. 509-530, June 2006.
- [82] A.Iera, A. Molinaro, S. Marano, "Call admission control and resource management issues for real-time VBR traffic in ATM-satellite networks", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 18, no. 11, pp. 2393-2403, 2000.
- [83] P.Pace, G.Aloi, S.Marano, "Efficient real-time multimedia connections handling over DVB-RCS satellite system", *in Proc. Globecom'04*, Dallas, Texas, USA, Dec.2004.
- [84] H. Koraitim, S. Tohmé, "Resource allocation and connection admission control in satellite networks", IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 17, no. 2, pp. 360-372, Feb.1999.
- [85] D. Niyato, E. Hossain, "A Novel Analytical Framework for Integrated Cross-Layer Study of Call-Level and Packet-Level QoS in Wireless Mobile Multimedia Networks", *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol.6, no.3, pp.322-335, March 2007.
- [86] B. Rong, Y. Qian, H.-H. Chen, "Adaptive Power Allocation and Call Admission Control in Multiservice WIMAX Access Networks", *IEEE Wirel. Commun.*, vol.14, no.1, pp.14-19, Feb. 2007
- [87] Y. Zhang, "Call Admission Control in Wireless Networks over Rayleigh Fading Channel", in Proc. of Wirel. Commun. and Netw. Conference, WCNC, Hong Kong, March 2007
- [88] P.P.Pham, S.Perreau, and A.Jayasuriya, "New Cross-Layer Design Approach to Ad Hoc Networks Under Rayleigh Fading", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.23, no.1, pp.28 - 39, Jan. 2005
- [89] Y.Fang, Yi Zhang, "Call admission control schemes and performance analysis in wireless mobile networks", *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 51, no. 2, pp. 371-382, Mar. 2002.

- [90] D.K.Petraki, M.P.Anastasopoulos and P.G.Cottis, "Call Admission Control in Satellite Networks under Rain Fading", *IEEE Commun. Let.*, vol.12, no.5, pp.377-379, May 2008.
- [91] S. Livieratos, G. Ginis and P. G. Cottis, "Availability and performance of satellite links suffering from interference by an adjacent satellite and rain fades", *Inst. Elect. Eng. Proc. Commun.*, vol. 146, no. 1, pp. 61•67, Feb. 1999.
- [92] M.P.Anastasopoulos, D.K.Petraki, A.V.Vasilakos, H.H.Chen and P.G.Cottis, "Call Admission Control For Multiclass Traffic Under Rain Fading in Satellite Networks", *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, to appear.
- [93] A.S.Alfa, W. Li., "A homogeneous pcs network with markov call arrival process and phase type cell residence time", *Wireless Network.*, vol. 8, no. 6, pp. 597-605, 2002.
- [94] M.F. Neuts, "Matrix-Geometric Solutions in Stochastic models: An Algorithmic Approach", John Hopkins, 1981
- [95] D.P. Gaver, P.A. Jacobs and G. Latouche, "Finite Birth-and-Death Models in Randomly Changing Environments", *Advances in Applied Probability*, vol.16, no.4, pp. 715-731, 1984.
- [96] D.K. Petraki, M.P. Anastasopoulos, A.V.Vasilakos and P.G. Cottis, "TCP-Aware Call Admission Control in High Altitude Platforms using Cross Layer Design", Wireless Personal Communication, to appear.
- [97] X.Wang, D.Y.Eun, W.Wang, "A TCP-aware call admission control scheme for packet-switched wireless networks", in Proc. of IEEE Int. Performance, Computing, and Commun. Conf., IPCCC 2006, Phoenix, Arizona, Apr.2006.
- [98] G.Theodoridis, C.Roseti, N. Pavlidou and M. Luglio, "TCP-Call Admission Control Interaction in Multiplatform Space Architectures", EURASIP J. Wirel. Commun. Netw., vol.2007, doi 10.1155/2007/23923
- [99] C.Barakat and E.Altman, "Bandwidth tradeoff between TCP and link-level FEC", *Computer Networks*, vol.39, no.2, pp.133-150, 2002.
- [100] S.Bertorelli and A.Paraboni, "Simulation of Joint Statistics of Rain Attenuation in Multiple Sites Across Wide Areas Using ITALSAT Data", *IEEE Trans. Ant. Propag.*, vol.53, no.8, pp.2611-2622, Aug. 2005.
- [101] P.Ghosh, K.Basu, S.Das, "A Game Theory-Based Pricing Strategy to Support Single/Multiclass Job Allocation Schemes for Bandwidth-Constrained Distributed Computing Systems", *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol.18, pp.289-306, March 2007
- [102] Penmatsa, A. Chronopoulos, "Job Allocation Schemes in Computational Grids Based on Cost Optimization", *in proc. of IPDPS*' 05, Denver, Colorado, USA, Apr.2005
- [103] K.M.Sim, K. F. Ng, "A Relaxed-Criteria Bargaining Protocol for Grid Resource Management", in Proc. of CCGRID 2006, Singapore, May 2006
- [104] P.Ghosh, N.Roy, S. K. Das, K. Basu, "A Game Theory based Pricing Strategy for Job Allocation in Mobile Grids", *in Proc. of IPDPS*'04, Santa Fe, New Mexico, Apr.2004.
- [105] K.-D.Lee, V.C.M.Leung, "Fair Allocation of Subcarrier and Power in an OFDMA Wireless Mesh Network", IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.24, pp.2051-2060, Nov.2006

- [106] Z.Han, Z. Ji, K.J.R. Liu, "Fair Multiuser Channel Allocation for OFDMA Networks Using Nash Bargaining Solutions and Coalitions", *IEEE Trans. Commun.*, vol.53, pp. 1366-1376, Aug. 2005
- [107] T.K.Chee, C.C.Lim, J.Choi, "A Cooperative Game Theoretic Framework for Resource Allocation in OFDMA Systems", *in proc. of ICCS'06*, University of Reading, UK, May 2006.
- [108] J. Virapanicharoen, W. Benjapolakul, "Fair-Efficient Threshold Parameters Selection in Call Admission Control for CDMA Mobile Multimedia Communications using Game Theoretic Framework", in proc. of CCNC'05, Las Vegas, Nevada, USA, Jan.2005.
- [109] J. Virapanicharoen, W. Benjapolakul, "Fair-Efficient Guard Bandwidth Coefficients Selection in Call Admission Control for Mobile Multimedia Communications using Game Theoretic Framework", in proc. of ICC'04, Paris, France, June 2004.
- [110] A. Rubinstein, "Perfect equilibrium in a bargaining model", *Econometrica*, vol.50, no.1, pp.97-109, Jan. 1982.
- [111] I.Ståhl, "Bargaining Theory", Economics Research Institute, Stockholm School of Economics, Stockholm, 1972
- [112] D.K.Petraki, M.P.Anastasopoulos, H.H.Chen and P.G.Cottis, "Resource Allocation and Call Admission Control for emergency services in satellite networks: A Game Theory approach", *IEEE Trans. on Comput. Intell. AI Games*, conditionnaly accepted.
- [113] D. Fudenberg, J. Tirole, "Game Theory", MIT Press, 1991
- [114] A.Shaked, J. Sutton, "Involuntary Unemployment as a Perfect Equilibrium in a Bargaining Model", *Econometrica*, vol.52, no.6, pp. 1351-1364, Nov., 1984.
- [115] K. Chaterjee, H. Sabourian, "Multiperson bargaining and strategic complexity", *Econometrica*, vol. 68, No. 2, pp, 1491-1509. Nov., 2000.
- [116] B.C. Gremont, M.Filip, "Spatio-temporal rain attenuation model for application to fade mitigation techniques", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.52, no.5, pp. 1245-1256, May 2004
- [117] ITU-R Recommendation P. 838-2, "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods", 2003.
- [118] A. Papoulis, S. Unnikrishna Pilai, "Probability, random variables and stochastic processes", McGraw-Hill, 4th edition, ISBN 0-07-366011-6, 2002.
- [119] Α.Ε.Drougas, "Μοντέλα Επίδοσης των Πρωτοκόλλων TCP/IP σε Δορυφορικά και LMDS Δίκτυα", Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Μαϊος 2008.
- [120] J.D.Kanellopoulos, S.G.Koukoulas, N.J.Kolliopoulos, C.N.Capsalis, G. Ventouras, "Rain attenuation problems affecting the performance of microwave communication systems", Ann. Telecommun., vol. 45, no. 7-8, pp. 437-451, 1990.
- [121] J.D.Kanellopoulos, S.Ventouras, C.N.Vazouras, "Revised model for the prediction of differential rain attenuation on adjacent Earth-space propagation paths", *Radio Science*, vol.28, pp.1071-1086, 1993.
- [122] J.D.Kanellopoulos, R.H.Clarke, "Prediction of cross-polarization discrimination statistics for propagation through spatially nonuniform rain" *Radio Science*, vol. 16, no. 2, pp.197-201, Feb. 1981.

- [123] A.D.Panagopoulos, J.D.Kanellopoulos, "On the rain attenuation dynamics: spatial-temporal analysis of rainfall rate and fade duration statistics", *Int. J. Sat. Commun. Netw.*, vol. 21, pp. 595-611, 2003.
- [124] A.D.Panagopoulos, J.D.Kanellopoulos, "Statistics of differential rain attenuation on converging terrestrial propagation paths", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 51, no. 9, pp. 2514-2517, Sep. 2003.
- [125] A.D.Panagopoulos, "Στοχαστικά μοντέλα διάδοσης Η/Μ κυμάτων σε συχνότητες άνω των 10 ΓΗζ με εφαρμογή στη σχεδίαση δορυφορικών συστημάτων επικοινωνίας", Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π., Μάρτιος 2002.
- [126] A.E.Drougas, A.D.Panagopoulos, P.G.Cottis, "Data transmission over rain-faded broadband fixed wireless access channels", *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 53, no. 3, pp. 871-876, Aug. 2007.
- [127] A. E. Drougas, A. D. Panagopoulos, P. G. Cottis, "Estimation of packet losses due to propagation impairments: Application to TCP performance over satellite", *Int. J. Sat. Commun. Netw.*, vol 26, no. 1, pp. 57-81, Jan. 2008.
- [128] A. E. Drougas, A. D. Panagopoulos, P. G. Cottis, "Packet error statistics of LOS broadband fixed wireless access channels", *IEEE Trans. Commun.*, vol.57, no.1, pp.22-25, Jan.2009.

ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ

- D.K.Petraki, M.P.Anastasopoulos, H.H.Chen and P.G.Cottis, "Resource Allocation and Call Admission Control for emergency services in satellite networks: A Game Theory approach", *IEEE Trans. on Comput. Intell. AI Games*, conditionnaly accepted.
- D.K. Petraki, M.P. Anastasopoulos, A.V.Vasilakos and P.G. Cottis, "TCP-Aware Call Admission Control in High Altitude Platforms using Cross Layer Design", Wireless Personal Communication, to appear.
- M.P.Anastasopoulos, D.K.Petraki, A.V.Vasilakos, H.H.Chen and P.G.Cottis, "Call Admission Control For Multiclass Traffic Under Rain Fading in Satellite Networks", *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, to appear.
- 4. D.K.Petraki, M.P.Anastasopoulos and P.G.Cottis, "Call Admission Control in Satellite Networks under Rain Fading", *IEEE Commun. Let.*, vol.12, no.5, pp.377-379, May 2008.
- D.K.Petraki, M.P. Anastasopoulos and P.G. Cottis, "Dynamic Resource Allocation in DVB-RCS Networks", *Int. J. Sat. Commun. Netw.*, vol.26, no.3, pp.189-210, 2008.
- D.K. Petraki, M.P Anastasopoulos, A.D. Panagopoulos and P.G. Cottis, "Dynamic Resource Calculation Policy in MF-TDMA Satellite Networks", *in proc. of MOBILE SUMMIT* '07, Budapest, July 2007