

ΙΟΝΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Τμήμα Πληροφορικής



Διπλωματική Εργασία

Ερευνητικές Κατευθύνσεις στην Πληροφορική

Μελέτη πρωτοκόλλων μεταφοράς σε δορυφορικά
περιβάλλοντα

Ιωάννης Αγγέλης – ΠΜΕ201901

Επιβλέπων: Αν. Καθηγητής Εμμανουήλ Μάγκος

17 Σεπτεμβρίου 2021

Επιβλέπων Καθηγητής

Εμμανουήλ Μάγκος, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Τριμελής Επιτροπή

Εμμανουήλ Μάγκος, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Μάρκος Αυλωνίτης, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Κωνσταντίνος Οικονόμου, Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Στην οικογένεια μου που με στήριξε στην δυσκολότερη περίοδο της ζωής μου.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, τα δορυφορικά περιβάλλοντα έχουν γνωρίσει σημαντική άνθηση, λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν σε πολλές περιπτώσεις, ιδιαίτερα όπου η επικοινωνία με άλλα μέσα δεν είναι εύκολα εφικτή λόγω απουσίας των απαραίτητων υποδομών. Τα δορυφορικά δίκτυα παρέχουν αρκετά ευρεία κάλυψη, σε σημείο που μπορούν να παρέχουν πρόσβαση στο Διαδίκτυο για μία ολόκληρη ήπειρο ή ακόμη και το μεγαλύτερο μέρος του πλανήτη.

Τα δίκτυα αυτά παρουσιάζουν διάφορες ιδιαιτερότητες, οι οποίες οφείλονται στο φυσικό κανάλι μετάδοσης των δεδομένων, λόγω των μεγάλων αποστάσεων που υπάρχουν μεταξύ της Γης και των δορυφόρων, ενώ υπάρχει αυξημένη πιθανότητα σφάλματος κατά τη μετάδοση. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών, η επικοινωνία σε αυτά τα δίκτυα χαρακτηρίζεται από υψηλές καθυστερήσεις αλλά παρέχεται υψηλό bandwidth-delay product. Για τους λόγους αυτούς, τα πρωτόκολλα μεταφοράς διαδραματίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο για την απόδοση και την ευρύτερη επιτυχία των δορυφορικών δικτύων.

Έτσι, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, επιλέγονται και υλοποιούνται τρία διαφορετικά πρωτόκολλα μεταφοράς που ανήκουν στην κατηγορία Transmission Control Protocol (TCP): New Reno, Westwood και Hybla. Τα πρωτόκολλα αυτά συγκρίνονται πειραματικά υπό διαφορετικές συνθήκες, ώστε να φανεί κατά πόσο η συμπεριφορά τους ταιριάζει με τη θεωρητική και αυτή που συναντάται στη βιβλιογραφία. Για τη σύγκριση αυτή, χρησιμοποιείται ένα σχετικά ρεαλιστικό περιβάλλον που βασίζεται στον προσομοιωτή OMNeT++ και την επέκτασή του, το INET.

Η αξιολόγηση των τριών πρωτοκόλλων μεταφοράς εστιάζει σε διάφορες μετρικές και συγκεκριμένα στο throughput, το πλήθος των ACKs που λαμβάνονται σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα, κ.ά. Ο πειραματισμός γίνεται για διαφορετικές παραμέτρους που αφορούν τα χαρακτηριστικά των κόμβων, του όγκου της πληροφορίας προς μετάδοση και των ζευξέων μεταξύ των κόμβων.

Στα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον πειραματισμό επιβεβαιώνεται η θεω-

ρητική, όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, το Hybla επιτυγχάνει υψηλότερο throughput, λόγω της πιο απότομης αύξησης του congestion window που ενδείκνυται για δορυφορικά περιβάλλοντα για την αξιοποίηση του υψηλού bandwidth-delay product. Το Westwood έχει καλύτερα αποτελέσματα από το New Reno, λόγω του ότι προσαρμόζεται καλύτερα στο περιβάλλον χάρει στο μηχανισμό εκτίμησης του bandwidth.

Λόγω των περιορισμών του περιβάλλοντος προσομοίωσης, προκύπτουν διάφορες ιδέες για μελλοντικές βελτιώσεις για την ακόμη πιο εκτεταμένη πειραματική αξιολόγηση των πρωτοκόλλων υπό διάφορες συνθήκες. Ένα αρκετά υποσχόμενο framework που εστιάζει σε δορυφορικά περιβάλλοντα είναι το ESTNeT, το οποίο θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για ακόμη πιο ρεαλιστικές συνθήκες. Επιπλέον, θα μπορούσαν να αξιολογηθούν ακόμη περισσότερα πρωτόκολλα τύπου CoAP και MQTT.

Abstract

Satellite communications have had an enormous rise in the last century. This can be mainly attributed to their ability to cover large areas of ground where communication cannot be otherwise achieved, due to the lack of alternative infrastructures. Satellite networks can provide a large enough ground coverage and therefore allow continents, or even the majority of the planet to connect to the Internet. These networks present various intricate properties, which can be attributed to the physical channel for data transmission, the magnitude of the distances between the Earth and its satellites, and consequently the high probability of errors during transmissions. All of the described properties lengthen the transmission times and cause high bandwidth-delay product. For all these reasons, transport protocols play a critical role in the performance and success of the satellite networks.

This thesis studies and implements three different Transmission Control Protocols (TCP): New Reno, Westwood and Hybla, and their behaviour is compared to the underlying theoretic modelling and the findings of the literature. To make this experimental comparison possible, a highly realistic environment is used, that is based on the OMNeT++ network simulator and the INET framework.

The evaluation of these three TCP protocols focuses on metrics such as throughput, the number of acknowledgements (ACKs) received in a given time interval, etc. The experimentation takes place under different parameters, such as different number of nodes, volume of information to be transmitted and nodes' links.

The acquired results are generally in agreement with the theoretical findings of the literature. In more detail, Hybla protocol achieves the highest throughput, which can be attributed to the more abrupt increase of the congestion window, a fact that also makes it suitable for satellite environments, where the high bandwidth-delay product can be exploited. At the same time, Westwood protocol performs better than New Reno, due to its ability to adapt to the environmental changes using its

bandwidth estimation mechanism.

Due to the restrictions of the simulation environment, different ideas for future improvements are discussed that focus on further extending the experimental evaluation of the protocols under more diverse conditions. A highly promising framework that focuses on satellite environments is ESTNeT, which could be used to achieve more realistic conditions, while other protocols like CoAP and MQTT could also be taken into account.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Εμμανουήλ Μάγκο ο οποίος με άφησε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης να ευχαριστήσω το μέλος της τριμελούς επιτροπής τον καθηγητή Μάρκο Αυλωνίτη για τα σχόλια που έκανε για την βελτίωση αυτής της εργασίας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά το καθηγητή δικτύων Κωνσταντίνο Οικονόμου για αμέριστη συμβολή του σε αυτήν την διπλωματική εργασία καθώς και για τις εποικοδομητικές συναντήσεις που κάναμε ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση που είχα στην διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών καθώς και για τις επιλογές που έκανα. Επίσης την σημαντική ψυχολογική συμπαράσταση που μου παρείχαν κατά την διάρκεια τις "πανδημίας".

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή και πολύ κάλο φίλο Κώστα Ξ. για την στήριξη και την εμπάθεια που είχαμε ένας στον άλλον σε αυτές τις δύσκολες περιόδους. Ελπίζω κάποια μέρα να καταφέρουμε να ξανά σμίξουμε διότι περάσαμε αρκετές καλές και κακές στιγμές μαζί. Ωστόσο θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά τους φίλους και συνεργάτες τα τελευταία τρία χρονιά. Ξεκινώντας με τον Αλέξανδρο, την Ανδριάννα, τον Αστέριο, τον Κώστα Μ., την Κορίνα και τον Θανάση για τις καλές και κακές στιγμές που είχαμε ως ομάδα. Τώρα έχουμε αρχίσει και παίρνει ο καθένας τον δρόμο του, ελπίζω κάποια στιγμή στο μελών να ξανασμίξουμε είτε ακαδημαϊκά είτε ως φίλοι.

Περιεχόμενα

A´	Εισαγωγή	1
A´.1	Βιβλιογραφική Έρευνα	3
A´.1.1	Συνεισφορά Εργασίας	4
A´.2	Δομή Εργασίας	5
B´	Δορυφόροι	7
B´.1	Τύποι τροχιών	7
B´.1.1	Low Earth Orbit (LEO)	8
B´.1.2	Medium Earth Orbit (MEO)	10
B´.1.3	Highly Elliptical Orbit (HEO)	10
B´.1.4	Geosynchronous Equatorial Orbit (GEO)	10
B´.2	Τροχίες	11
B´.2.1	Position και Velocity Vectors	12
B´.2.2	Orbital Elements	15
B´.2.3	Satellite Footprint	18
B´.3	Satellite Constellation	20
B´.4	Ανάλυση των επίπεδων των δορυφορικών επικοινωνιών	22
B´.5	Τύποι δορυφορικών δικτύων	26
B´.5.1	Communication Bands	26
B´.5.2	Ψηφιακές Τηλεπικοινωνίες	27
Γ´	Transport Protocols	33
Γ´.1	Internet Protocol	33
Γ´.2	User Datagram Protocol	36
Γ´.3	Transmission Control Protocol	39

Περιεχόμενα	vii
Γ'.3.1 TCP New Reno	51
Γ'.3.2 TCP Westwood	52
Γ'.3.3 TCP Hybla	54
Γ'.4 CoAP και MQTT	55
Δ' Πειράματα και αποτελέσματα	57
Δ'.1 Ανάλυση περιβάλλοντος	57
Δ'.2 Πειράματα	59
Ε' Σύνοψη και Συμπεράσματα	69
Βιβλιογραφία	70
Παραρτήματα	82
Γλωσσάρι Ξενικών Όρων	83
Συμβολισμοί Μεγεθών	85
Συντομογραφίες	87
Ευρετήριο	90

Κατάλογος Σχημάτων

B'.1 Σχηματική αναπαράσταση των τροχιών LEO,MEO,HEO και GEO.	8
B'.2 Ελλειπτικές τροχιές	11
B'.3 Αναπαράσταση ενός διανύσματος $\mathbf{A}$ σε ένα καρτεσιανό τρισδιάστατο επίπεδο	12
B'.4 Αναπαράσταση ενός αντικείμενου P που κινείται στον χώρο	14
B'.5 Αναπαράσταση της έλλειψης	16
B'.6 Αναπαράσταση των Kepler Orbits	17
B'.7 Αναπαράσταση των Kepler Orbits	18
B'.8 Αναπαράσταση της κάλυψης της Γης από τον δορυφόρο σε διαφορετικά υψόμετρα.	19
B'.9 Αναπαράσταση των γωνιών ανύψωσης και της κεντρικής γωνίας κάλυψης καθώς και τις απόστασης Εμβέλειας Κλίσης	20
B'.10 Σχηματική αναπαράσταση ενός υποθετιμένου Satellite Constellation	21
B'.11 OSI layers	23
B'.12 Σχηματική αναπαράσταση των δορυφορικών καναλιών.	28
B'.13 Σχηματική αναπαράσταση της αφαιρετικής αρχιτεκτονικής των επίγειων σταθμών	29
B'.14 Σχηματική αναπαράσταση του κωδικοποιημένου καναλιού	31
Γ'.1 Internet Stack	34
Γ'.2 IP Header	35
Γ'.3 UDP model	37
Γ'.4 Ενθυλάκωση του UDP datagram μέσα στο IP datagram	37
Γ'.5 Ενθυλάκωση του UDP datagram μέσα στο IP datagram	38
Γ'.6 Ενθυλάκωση του TCP segment μέσα στο IP datagram	40

Γ'.7 TCP header	41
Γ'.8 Διάγραμμα καταστάσεων του TCP	43
Γ'.9 Σχηματική αναπαράσταση της εδραίωσης και του τερματισμού της TCP σύνδεσης	44
Γ'.10 Σχηματική αναπαράσταση του Sliding Window	46
Δ'.1 Σχηματική αναπαράσταση της τοπολογίας αστέρα	58
Δ'.2 Μέσο Throughput των κόμβων για error rate = 0.1. Με μέγεθος αρχείου Δ'.2α' : 100 <i>KiB</i> , Δ'.2β' : 500 <i>KiB</i> και Δ'.2γ' : 1000 <i>KiB</i> . . .	60
Δ'.3 Μέσο Throughput των κόμβων για error rate = 0.2. Με μέγεθος αρχείου Δ'.3α' : 100 <i>KiB</i> , Δ'.3β' : 500 <i>KiB</i> και Δ'.3γ' : 1000 <i>KiB</i> . . .	61
Δ'.4 Μέσος αριθμός Acks προς μέσο χρόνο για αρχεία μεγέθους 100, 500, 1000 <i>Kib</i> και error rate στο Δ'.4α' 0.0, Δ'.4β' 0.1 και Δ'.4γ' 0.2	62
Δ'.5 Μέσος αριθμός Acks προ τον μεσο χρόνο για error rate 0.2, μέγεθος αρχείων 100, 500, 1000 <i>Kib</i> για 50 κόμβους. Delay Δ'.5α' : 200 <i>ms</i> , Δ'.5α' : 300 <i>ms</i>	63
Δ'.6 Το fairness των TCP για 1000 <i>Kib</i> μέγεθος αρχείου για error rate Δ'.6α' 0.0, Δ'.6β' 0.1 και για Δ'.6γ' 0.2	64
Δ'.7 Τα Sequence Numbers των TCP σε segmanets για 50 συνδέσεις με error rate 0.1 και μέγεθος αρχείου 1000 <i>Kib</i>	66

Κατάλογος Πινάκων

<i>B.1 Πινάκας συχνοτήτων</i>	27
---	----

Κεφάλαιο Α΄

Εισαγωγή

Μια από τις πιο σημαντικές και δύσκολες κατακτήσεις της ανθρωπότητας είναι η κατάκτηση και η εξερεύνηση του διαστήματος. Ωστόσο για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο απαραίτητη προϋπόθεση είναι οι άνθρωποι να μπορούν επικοινωνήσουν άμεσα οπουδήποτε και αν βρίσκονται στην Γη. Αυτό πραγματοποιείται μεσώ των δικτύων για την διακίνηση της πληροφορίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ότι πριν γίνει ευρέως γνωστή η τεχνολογία των τηλεφώνων τα γράμματα που στέλνονταν μπορεί να χρειάζονταν μήνες μέχρι να φτάσουν στον τελικό προορισμό τους. Καταλαβαίνουμε ότι δεν θα μπορούσαμε να φτάσουμε στο σημείο που είμαστε αν δεν υπήρχε η άμεση επικοινωνία και η ελεύθερη πρόσβαση στην πληροφορία. Τα δορυφορικά δίκτυα επεκτείνουν τα επίγεια δίκτυα εκεί που δεν υπάρχουν υποδομές και προσφέρουν διάφορες υπηρεσίες στους χρήστες που τα χρησιμοποιούν. Οι δορυφόροι μπορούν να καλύψουν μεγάλες εκτάσεις Γης μέχρι και ολόκληρες ηπείρους. Οι υπηρεσίες που προσφέρουν είναι στρατιωτικές, τηλεφωνικές, τηλεοπτικές καθώς και πρόσβαση στο Διαδίκτυο.

Όλα ξεκίνησαν μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο όπου κατά την διάρκεια του είχαν αναπτυχθεί δυο πολύ διαφορετικές τεχνολογίες. Η χρήση και ο συνδυασμός δυο σημαντικών τεχνολογιών γέννησε τις δορυφορικές τηλεπικοινωνίες. Η πρώτη εξ αυτών είναι η τεχνολογία των μικροκυμάτων, η οποία αναπτύχθηκε εκτεταμένα για την κατασκευή των ραντάρ καθώς και συνέβαλλε στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες. Η δεύτερη είναι η τεχνολογία των πυραύλων (missiles) οι οποίοι προωθούνται από την εκτόξευση αερίων που προέρχονται από στερεά ή υγρά καύσιμα. Ένας από τους πρώτους πυράυλους μεγάλου βεληνεκούς ήταν ο V-2 Rocket ο οποίος κατασκευάστηκε από τους

Γερμανούς.

Το 1957 τέθηκε σε τροχιά γύρω από τη Γη ο πρώτος τεχνητός δορυφόρος (Sputnik), ξεκινώντας έτσι τη διαστημική εποχή. Το 1965 χρησιμοποιήθηκε για εμπορική χρήση ο γεωστατικός δορυφόρος Intelsat I. Οι πρώτοι δορυφόροι δεν μπορούσαν να εξυπηρετήσουν πολλούς χρήστες και είχαν σχετικά ακριβό κόστος [1]. Για παράδειγμα ο Intelsat I ήταν ένας δορυφόρος 68kg που μπορούσε να υποστηρίξει 480 τηλεφωνικά κανάλια με ετήσιο κόστος 32.500\$ για κάθε κανάλι. Το κόστος αυτό προέκυπτε από τον συνδυασμό του κόστους του πυραύλου, του δορυφόρου, της μικρής διάρκειας ζωής του δορυφόρου (περίπου 1.5 χρόνο εκείνη την εποχή) και τέλος η αδυναμία αποδοτικής εξυπηρέτησης πολλών χρηστών. Σήμερα αυτό το κόστος έχει μειωθεί σημαντικά και έχει οδηγήσει σε αξιόπιστες εκτοξεύσεις δορυφόρων οι οποίοι διαθέτουν πολύ μεγαλύτερη μάζα (συνήθως 6000kg). Επιπλέον η αύξηση της τεχνογνωσίας στις τεχνικές των μικροκυμάτων, η χρήση πολλαπλών κεραιών, η εναλλαγή των συχνοτήτων από την μια κεραία στην άλλη καθώς και οι ενσωματωμένοι ενισχυτές σήματος που χρησιμοποιούνται, συμβάλλουν στην αύξηση του πλήθους των χρηστών που χρησιμοποιούν τους δορυφόρους και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του κόστους ανά τηλεφωνικό κανάλι.

Οι δορυφόροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την παροχή τηλεοπτικών υπηρεσιών. Είναι ιδιαίτερα σημαντική η χρήση τους για την ανταλλαγή τηλεοπτικών προγραμμάτων ανάμεσα στους ραδιοτηλεοπτικούς φορείς, για την διανομή των προγραμμάτων σε ραδιοφωνικούς σταθμούς ή σε διαφορετικούς καταναλωτές. Τα συστήματα αυτά ονομαστικά είναι direct broadcasting by satellite (DBS) [2] ή Direct to Home (DTH) συστήματα [3]. Μια συνεχώς αναπτυσσόμενη υπηρεσία είναι το Digital Video Broadcasting by Satellite (DVB-S) το οποίο αναπτύχθηκε το 1993. Πλέον, βρισκόμαστε στη δεύτερη γενιά DVB-S2 η οποία έγινε πρότυπο από το European Telecommunication Standard Institute (ETSI). Τα DBS συστήματα λειτουργούν με μικρούς επίγειους σταθμούς με διάμετρο κεραίας από 0.5m έως 1m.

Ίσως μια από τις πιο σημαντικές υπηρεσίες που προσφέρουν οι δορυφόροι είναι η πρόσβαση στο διαδίκτυο. Ειδικότερα αυτή η υπηρεσία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε απόμακρες περιοχές στις οποίες δεν υπάρχουν οι απαραίτητες υποδομές για την πρόσβαση στο διαδίκτυο. Αρκετές εταιρίες έχουν εισέλθει σε αυτόν τον χώρο για την παροχή Internet μέσω δορυφόρων όπως το Starlink, OneWeb, Globalstar, Orbvomm, Iridium Communication, O3b καθώς και πολλές άλλες εταιρίες. Το 2021 υπολογίστηκε πως το μέγεθος της αγοράς είναι στα \$71.58B και προβλέπεται ότι μέχρι το 2028 θα

προσφέρει έσοδα αξίας \$137.63B [4]. Φαίνεται ότι υπάρχει μια μεγάλη αύξηση τις αγοράς η οποία θα φέρει και άλλες εταιρίες στην παροχή δορυφορικών υπηρεσιών όπως το Internet. Ένα σημαντικό κομμάτι του Internet είναι η διακίνηση - μεταφορά της πληροφορίας μέσα από τα δίκτυα υπολογιστών. Όλες σχεδόν οι υπηρεσίες που χρησιμοποιούνται στο διαδίκτυο βασίζονται στα πρωτοκολλά μεταφοράς για την διανομή της πληροφορίας. Στα δορυφορικά δίκτυα, λόγω της μεγάλης απόστασης που έχει η Γη με τους δορυφόρους, παρουσιάζονται διάφορα προβλήματα στα πρωτοκολλά μεταφοράς.

Α'.1 Βιβλιογραφική Έρευνα

Τα πρωτοκολλά μεταφορά είναι χωρισμένα σε δυο μεγάλες κατηγορίες στα αξιόπιστα όπως το TCP και τα αναξιόπιστα για παράδειγμα το UDP. Το UDP είναι αναξιόπιστο πρωτόκολλο διότι αν χαθεί κάποιο πακέτο κατά την μεταφορά δεν προσπαθήσει να το επαναμετοδόση σε αντιθέσει με το TCP που θα προσπαθήσει να επαναμετοδόση το πακέτο. Το πρώτο TCP το οποίο προτάθηκε ήταν στην δεκαετία του 1980 και ονομαστικέ TCP Tahoe όπου χρησιμοποιεί τους αλγορίθμους Slow-Start, Congestion Avoidance, Fast Retransmit [5]. Έχουνε προταθεί διάφορες παραλλαγές του TCP οπου ταιριάζουν καλύτερα σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα όπως για παράδειγμα το DCTCP [6] το οποίο είναι σχεδιασμένο ώστε να ανταποκρίνεται στις ανάγκες των Data Centers. Άλλες παραλλαγές του TCP είναι ονομαστικά Reno, New Reno, Westwood, Vegas, Hybla, BIC, CUBIC, BBR, Peach, SCTP καθώς και πολλά άλλα. Το TCP Hybla προτάθηκε για την χρήση σε δορυφορικά περιβάλλοντα [7].

Τα αποτελέσματα τις ερευνάς [8] δείχνουν ότι για να αυξηθεί η επίδοση του TCP πάνω σε ένα δορυφορικό κανάλι θα πρέπει να υλοποιηθούν οι μηχανισμοί SACK και PAWS ώστε να μπορούν να αντιμετωπίσουν το υψηλό bandwidth delay product που έχει το κανάλι. Οι ερευνητές επισημαίνουν ότι πρέπει να βρεθούν τρόποι για να μειωθεί αντίκτυπο του μηχανισμού Slow Start για τα μονοπάτια στο δίκτυο που έχουν υψηλό bandwidth delay product.

Στην εργασία [9] οι ερευνητές σύγκριναν μέσα από μια σειρά εκτεταμένων πειραμάτων τα TCP Westwood+, New Reno, Vegas. Στα πειράματα τα οποία έγιναν σε δορυφορικά κανάλια έδειξαν ότι το TCP Westwood+ έχει μεγαλύτερο Goodput σε σχέση με το TCP New Reno το οποίο οφείλετε στον μηχανισμό που έχει TCP Westwood+ για το estimation του bandwidth του καναλιού.

Άλλα πρωτοκολλά που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά δεδομένων πάνω από τα

δορυφορικά κανάλια είναι CoAP [10] και MQTT [11]. Το CoAP έχει ως βάση το UDP ενώ το MQTT χρησιμοποιεί το TCP για την μεταφορά των δεδομένων. Τα πρωτοκόλλα αυτά έχουν προταθεί για την επικοινωνία των IoT συσκευών με τους δορυφόρους [12]. Θα μιλήσουμε πιο αναλυτικά για αυτά τα πρωτοκόλλα στην ενότητα Γ΄.4.

Α΄.1.1 Συνεισφορά Εργασίας

Κύριος στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των πρωτοκόλλων μεταφοράς σε δορυφορικά περιβάλλοντα. Πιο συγκεκριμένα θα μελετήσουμε την συμπεριφορά του Transmission Control Protocol (TCP) και διαφόρων παραλλαγών του σε δορυφορικά κανάλια. Για την ακρίβεια, υλοποιήθηκαν τα πρωτόκολλα TCP New Reno, Westwood και Hybla.

Τα πρωτόκολλα αυτά επιλέχθηκαν για διάφορους λόγους. Πιο συγκεκριμένα, το TCP New Reno είναι ευρέως διαδεδομένο στη βιβλιογραφία στα δορυφορικά δίκτυα, διότι παρέχει ταχύτερες επαναμεταδόσεις και recovery σε σχέση με παλαιότερες προσεγγίσεις, όπως το TCP Reno. Ακόμη, έχει φανεί πως το εν λόγω πρωτόκολλο αποδίδει ιδιαίτερα καλά τόσο σε περιβάλλοντα με υψηλά ποσοστά θορύβου, όσο και αυτά με χαμηλά. Αντίστοιχα, το Westwood είναι μία παραλλαγή του New Reno, η οποία ενσωματώνει ένα μηχανισμό για την εκτίμηση του διαθέσιμου bandwidth. Τέλος, το Hybla επιλέχτηκε, αφού αυτό σχεδιάστηκε σκοπίμως για χρήση σε δορυφορικές επικοινωνίες και ετερογενή ασύρματα δίκτυα. Το πρωτόκολλο αυτό αυξάνει πιο ‘επιθετικά’ το congestion window, ώστε να αξιοποιήσουν καλύτερα το bandwidth της σύνδεσης, παρόλο που αυτό συνήθως χρησιμοποιείται για την αποφυγή συμφόρησης.

Τα επιλεγόμενα πρωτόκολλα αξιολογούνται πειραματικά σε περιβάλλον προσομοίωσης που βασίζεται στο OMNeT++. Η αξιολόγηση εστιάζει στη μελέτη και σύγκριση αυτών των πρωτοκόλλων υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, ώστε να φανεί κατά πόσο συνάδουν τα αποτελέσματα με αυτά που συναντώνται στη βιβλιογραφία. Πιο λεπτομερώς, η αξιολόγηση λαμβάνει υπόψιν μία πληθώρα παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένου του πλήθους των κόμβων, του όγκου των δεδομένων προς μετάδοση, καθώς και χαρακτηριστικά του καναλιού, όπως το error rate και το delay.

Από τα εξαγόμενα αποτελέσματα, προκύπτει πως σε μεγάλο βαθμό τα πρωτόκολλα αποδίδουν όπως περιγράφεται και στη βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, το Hybla αποδίδει καλύτερα ως προς το throughput, ενώ ακολουθεί το Westwood και το New Reno.

Κατ' επέκτασιν, το Westwood διαχειρίζεται καλύτερα πολλές συνδέσεις, με την έννοια ότι στις περισσότερες από αυτές η μεταφορά των δεδομένων διαρκεί σχεδόν το ίδιο χρονικό διάστημα. Αυτές οι συμπεριφορές απεικονίζονται και στο πλήθος των ACKs που λαμβάνουν οι κόμβοι κατά τη διάρκεια ενός δεδομένου χρονικού διαστήματος.

Α΄.2 Δομή Εργασίας

Σε αυτήν την ενότητα θα περιγράψουμε τη δομή που έχει η διπλωματική εργασία, η οποία έχει ως ακολούθως. Στο κεφάλαιο Β΄ θα αναφερθούμε στα βασικά χαρακτηριστικά των δορυφορικών επικοινωνιών. Πιο συγκεκριμένα στην ενότητα Β΄.1 θα αναφερθούμε στις διαφορετικές τροχιές που χρησιμοποιούνται για τις δορυφορικές επικοινωνίες, καθώς και τη χρήση τους σε διαφορετικές εφαρμογές. Στην ενότητα Β΄.2 θα μιλήσουμε για το πώς μπορούμε να μοντελοποιήσουμε την πορεία της τροχιάς μέσα στον τρισδιάστατο χώρο με την χρήση διανυσμάτων και να προσδιορίσουμε τον τύπο της τροχιάς και τη θέση του δορυφόρου στο τροχιακό επίπεδο με χρήση των Orbital Elements, καθώς και την επιφάνεια της Γης που καλύπτει ο δορυφόρος. Στην ενότητα Β΄.3 θα δούμε γιατί είναι σημαντικοί οι δορυφορικοί σχηματισμοί στις τηλεπικοινωνίες. Στην ενότητα Β΄.5 θα αναφερθούν οι βασικοί τύποι των δορυφορικών δικτύων, καθώς και οι συχνότητες και οι τεχνικές που εφαρμόζονται για να μεταδοθεί το σήμα που διαθέτει την πληροφορία.

Στο κεφαλαίο Γ΄ θα ορίσουμε την έννοια του πρωτοκόλλου και θα δούμε τις διαφορές ανάμεσα στα δυο πιο διαδεδομένα πρωτοκολλά μεταφοράς: το TCP και το UDP. Στην ενότητα Γ΄.1 θα δούμε τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου που χρησιμοποιεί το διαδίκτυο για την δρομολόγηση των πακέτων στον τελικό τους προορισμό. Στην ενότητα Γ΄.2 θα αναφερθούμε στις υπηρεσίες και τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου UDP. Θα αναλύσουμε και θα εξηγήσουμε του μηχανισμούς που χρησιμοποιεί το TCP για τη μεταφορά των δεδομένων καθώς και μερικές παραλλαγές του. Τέλος στην ενότητα Γ΄.4 θα αναφέρουμε εναλλακτικά πρωτόκολλα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις δορυφορικές επικοινωνίες σε διαφορετικά σενάρια.

Στο κεφάλαιο Δ΄ θα αναλύσουμε τα πειράματα τα οποία έγιναν καθώς και τα αποτελέσματά τους. Συγκεκριμένα, αναλύονται οι παράμετροι που διερευνώνται κατά τον πειραματισμό, ενώ παρουσιάζονται τα εξαγόμενα από αυτόν αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα ερμηνεύονται βάσει των διαφορών που χρησιμοποιούνται στα διαφορετικά πρωτόκολλα και συγκρίνονται με τα αναμενόμενα από τη βιβλιογραφία.

Τέλος στο κεφάλαιο Ε΄ θα συζητήσουμε τα συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα διπλωματική εργασία. Ακόμη, περιγράφονται πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις, σύμφωνα με τις οποίες θα μπορούσε να γίνει πιο ρεαλιστική και εκτενή η πειραματική αξιολόγηση των πρωτοκόλλων.

Κεφάλαιο Β΄

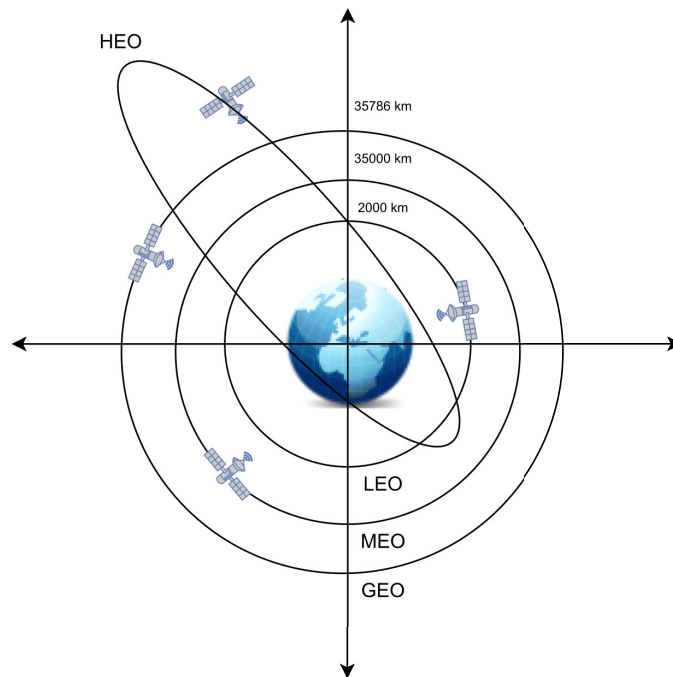
Δορυφόροι



ΟΡΥΦΟΡΟΣ είναι οποιοδήποτε ουράνιο σώμα το οποίο περιστρέφεται γύρω από ένα άλλο ουράνιο σώμα και ακολουθεί τους νόμους τις ουράνιας μηχανικής όπως για παράδειγμα το Φεγγάρι της Γης. Οι τεχνικοί δορυφόροι είναι οποιαδήποτε ανθρώπινη κατασκευή η οποία έχει τοποθετηθεί σε ουράνια τροχιά από τον άνθρωπο. Με το όρο δορυφόρος σε αυτό κείμενο θα εννοούμε οποιοδήποτε τεχνητό δορυφόρο έχει τοποθετήσει σε τροχιά ο άνθρωπος γύρω από την Γη. Υπάρχουν διάφοροι τύποι δορυφόρων για διαφορετικές χρήσεις όπως οι τηλεπικοινωνιακοί, οι μετεωρολογικοί καθώς και οι στρατιωτικοί. Όλες αυτές οι κατηγορίες έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά, όπως οι τροχιές που διαγράφουν και οι μέθοδοι των επικοινωνιών που χρησιμοποιούν. Σε αυτό το κεφαλαίο θα εξηγήσουμε τα χαρακτηριστικά και τις θέσεις των τροχιών άλλα και πώς υπολογίζονται. Τέλος θα δούμε τα επίπεδα από τα οποία αποτελούνται οι δορυφορικές επικοινωνίες.

Β΄.1 Τύποι τροχιών

Ένα σημαντικό μέρος των δορυφορικών επικοινωνιών είναι οι τροχιές που διανύουν οι δορυφόροι κατά την περιστροφή τους γύρω από την Γη. Όπως θα δούμε, οι διαφορετικοί τύποι τροχιών έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και εξυπηρετούν διαφορετικά σενάρια επικοινωνίας. Οι τύποι που θα αναλύσουμε είναι οι Low Earth Orbit, Medium Earth Orbit, High Elliptical Orbit και Geosynchronous Equatorial Orbit.



Σχήμα Β'.1: Σχηματική αναπαράσταση των τροχιών LEO, MEO, HEO και GEO.

Β'.1.1 Low Earth Orbit (LEO)

Τα δορυφορικά συστήματα χαμηλής τροχιάς ή Low Earth Orbit (LEO) βρίσκονται στη πιο κοντινή τροχιά στην οποία μπορεί να τοποθετηθεί κάποιος δορυφόρος. Ως LEO χαρακτηρίζονται οι δορυφόροι οι οποίοι έχουν τοποθετηθεί πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας στα 500 km και κάτω από τα 2.000 km . Η τοποθέτηση του δορυφόρου σε αυτήν την περιοχή έχει ως αποτέλεσμα η περίοδος γύρω από την Γη να είναι πάρα πολύ μικρή, της τάξης των 128 λεπτών ή λιγότερο κάνοντας τουλάχιστον 11.25 περιστροφές κατά την διάρκεια μιας ημέρας. Όπως θα δούμε και στη συνέχεια οι δορυφόροι που βρίσκονται σε αυτή την κατηγορία έχουν τη μικρότερη καθυστέρηση (delay) που μπορεί να φτάσει έως τα 100 ms . Ένα από τα μειονεκτήματα που έχει αυτή η κατηγορία είναι ότι ο χρόνος ζωής τους είναι μικρός σε σχέση με τις άλλες τροχιές. Δηλαδή οι δορυφόροι θα παραμείνουν στην τροχιά τους μέχρι να καταναλώσουν όλα τα καύσιμα τους οπότε τελικά και θα εισέλθουν στην ατμόσφαιρα της Γης.

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται Orbital decay και έχει σαν αποτέλεσμα την σταδιακή μείωση της απόστασης μεταξύ δυο σωμάτων που βρίσκονται σε τροχιά μετά από αρκετές περιόδους. Πολλοί παράγοντες συμβάλουν σε αυτό φαινόμενο τους οποίους

θα αναφέρουμε ονομαστικά. Ο πιο σύννηθες παράγοντας για του δορυφόρους που βρίσκονται στην τροχιά LEO είναι το Atmospheric drag. Επειδή οι δορυφόροι βρίσκονται πιο κοντά στην Γη η ατμοσφαίρα της είναι πυκνότερη με αποτέλεσμα τα μόρια των αερίων να συγκρούονται με τον δορυφόρο και να προκαλούν τριβές με την ατμοσφαίρα. Το φαινόμενο Light and Thermal Radiation επηρεάζει τα μικρά αντικείμενα που βρίσκονται στο ηλιακό μας σύστημα λόγω των ασύμμετρων πιέσεων ακτινοβολίας που ασκούνται στα αντικείμενα. Το Gravitational radiation είναι άλλος ένας παράγοντας που συμβάλει στο Orbital decay, επειδή όλα τα σώματα που είναι σε τροχιά εκπέμπουν βαρυτική ενεργεία, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα καμία τροχιά να μην είναι σταθερή στο πέρασ του άπειρου χρόνου. Τέλος έχουμε το Electromagnetic drag το οποίο προκαλείται από το μαγνητικό πεδίο της Γης και το Tidal effect που επιδρά στην μείωση του ύψους της τροχιάς. Αξίζει να σημειωθεί ότι όσα φαινόμενα αναφέρθηκαν ισχύουν και επηρεάζουν όλες τις τροχιές.

Οι δορυφόροι σε αυτές τις τροχιές δεν παρέχουν συνεχόμενη κάλυψη σε μια συγκεκριμένη περιοχή με αποτέλεσμα να χρειάζονται αρκετοί δορυφόροι για να επιτύχουν συνεχόμενη παγκόσμια κάλυψη. Θα μιλήσουμε στα επόμενα κεφαλαία για τα Satellite Constellation και πως μπορούν να παρέχουν παγκόσμια κάλυψη.

Αξίζουν επίσης να σημειωθούν μερικά κύρια ιστορικά στοιχεία και παραδείγματα. Το 1957 η Σοβιετική Ένωση έθεσε σε τροχιά γύρω από τη Γη τον πρώτο τεχνητό δορυφόρο με την ονομασία Sputnik 1, ο οποίος διέθετε έναν απλό πομπό και δεν είχε δυνατότητες επικοινωνιών. Την επομένη χρονιά το 1958 οι Ηνωμένες Πολίτες της Αμερικής έθεσαν σε τροχιά γύρω από την Γη τον Explorer I. Το 1990 τοποθετήθηκε το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble προς τιμήν του μεγάλου αστρονόμου Edwin Hubble για την παρακολούθηση του διαστήματος το οποίο παραμένει μέχρι και σήμερα σε λειτουργία. Το 1998 τέθηκε σε λειτουργία ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός (International Space Station) από την κοινή σύμπραξη της Αμερικάνικης Διαστημικής Υπηρεσίας NASA, της Ρωσικής Διαστημικής Υπηρεσίας Roscosmos, της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας ESA, της Καναδικής Διαστημικής Υπηρεσίας CSA και της Ιαπωνικής Διαστημικής Υπηρεσίας JAXA. Ο σκοπός του ISS είναι να χρησιμοποιηθεί ως παρατηρητήριο και εργαστήριο.

Β'.1.2 Medium Earth Orbit (MEO)

Δορυφόροι Μέσης Γήινης Τροχιάς ή Medium Earth Orbit (MEO) είναι οι δορυφόροι οι οποίοι τοποθετούνται σε ύψος μεγαλύτερο από $2.000km$ και μικρότερο από $35.786km$ πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι δορυφόροι που βρίσκονται σε αυτές τις τροχιές έχουν delay από $100ms$ έως $600ms$. Η περίοδος που έχουν όλοι οι MEO είναι μικρότερη από $24h$ και η ελάχιστη περίοδος που μπορούν να διανύσουν είναι $2h$. Επειδή οι δορυφόροι βρίσκονται σε μεγαλύτερο υψόμετρο από τους LEO χρειάζονται μικρότερος αριθμός δορυφόρων για να επιτευχθεί παγκόσμια συνεχή κάλυψη. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα LEO δορυφόρων είναι το Παγκόσμιο Συστήματα Ανεύρεσης ή Global Positioning System (GPS) [13] το οποίο αποτελείται από 24 δορυφόρους όπου είναι τοποθετούμενοι στα $20.400km$ πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Κάνουν μια πλήρη περιστροφή γύρο από την Γη με περίοδο $12h$.

Β'.1.3 Highly Elliptical Orbit (HEO)

Οι Ελλειπτικές τροχιές ή Highly Elliptical Orbit (HEO) είναι τροχιές οι οποίες όπως υποδηλώνει το όνομα τους έχουν ελλειψοειδή μορφή και μεγάλη εκκεντρικότητα. Στους HEO συμπεριλαμβάνονται οι Molniya orbits και οι Tundra orbit. Οι Molniya orbits όπου το όνομα τους το πήραν από τους στρατιωτικούς διάφορους Molniya που σημαίνει "Αστραπή" που έθεσαν σε τροχιά το 1965 η Σοβιετική Ένωση [14, 15]. Οι τροχιές Tundra είναι ελλειπτικές τροχιές οι οποίες οι δορυφόροι οι οποίοι τοποθετούνται διανύουν περισσότερη ώρα κοντά στην Γη και το φαινόμενο αυτό ονομάζεται Apogee Dwell. Στο σχήμα Β'.2 παρουσιάζονται η σχηματική αναπαράσταση των τροχιών. Η εταιρία Sirius Satellite Radio χρησιμοποιεί τις τροχιές των HEO και πιο συγκεκριμένα τις τροχιές Trundra για να κρατήσει του δορυφόρους τις πάνω από την Βόρεια Αμερική [16].

Β'.1.4 Geosynchronous Equatorial Orbit (GEO)

Οι Γεωστατικές τροχιές ή αλλιώς Geosynchronous Equatorial Orbit (GEO) όπως υποδηλώνει η ονομασία τους είναι κυκλικές τροχιές στις οποίες τοποθετούνται οι δορυφόροι σε υψόμετρο $35.786km$ πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Κάνουν μια πλήρη περίοδο σε $23h$ και $56m$ όπου είναι το ίδιο χρονικό διάστημα για να κάνει η Γη μια πλήρη περιστροφή γύρο από τον εαυτό της. Αυτό σημαίνει ότι ο το αντικείμενο



(α') Molniya orbit



(β') Tundra orbit

Σχήμα Β'.2: Ελλειπτικές τροχίες

το οποίο βρίσκεται σε αυτή τη θέση, ο παρατηρητής θα μπορεί να το εντοπίσει στον ουράνιο θόλο στην ίδια θέση κατά την διάρκεια όλης της ημέρας.

Επειδή οι δορυφόροι είναι τοποθετημένοι σε πολύ μεγάλο υψόμετρο πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας έχουν την δυνατότητα να καλύπτουν ολόκληρες ηπείρους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να χρειάζονται ελάχιστοι δορυφόροι για την πλήρη κάλυψη της Γης. Σύμφωνα με αυτήν την μελέτη [17] χρειάζονται 3 δορυφόρους για την κάλυψη της Γη με εξαίρεση του πόλους, αν συμπεριλάβουμε και του πόλους χρειαζόμαστε 4 δορυφόρους. Είναι φυσικό ότι όσο αυξάνεται η απόσταση της Γης με τον δορυφόρο αυξάνεται και το delay από 600ms έως 700ms [12].

Το 1961 ο Syncom I ήταν ο πρώτος δορυφόρος που τέθηκε σε τροχιά GEO από την NASA. Οι δορυφόροι σε αυτές τις τροχίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετεωρολογικές παρατηρήσεις, για πλοήγηση, για επικοινωνίες καθώς και στρατιωτικές επιχειρήσεις.

B'.2 Τροχαίες

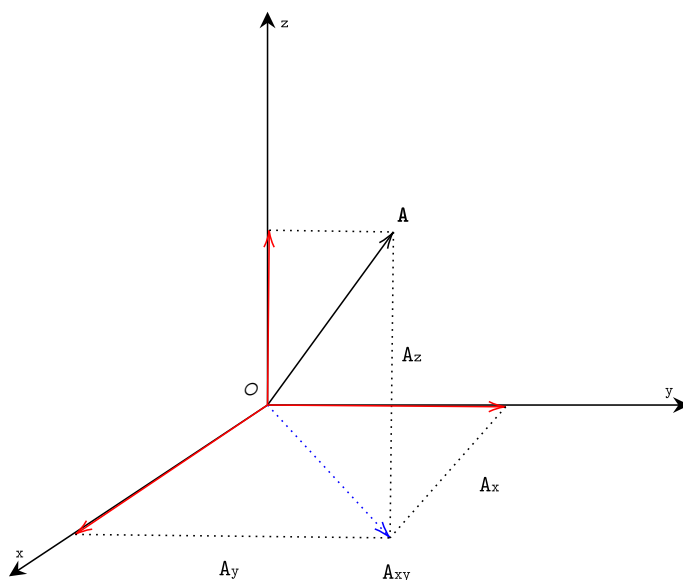
Στην ενότητα Β'.1 είδαμε του τύπους των τροχιών. Σε αυτή την ενότητα θα δούμε πως μπορούμε να μοντελοποιήσουμε και να κατασκευάσουμε τις τροχίες. Θα αναφερθούμε και στους φυσικούς νόμους που διέπουν το συγκεκριμένο φαινόμενο. Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούν μόνο οι βασικές έννοιες γιατί ξεφύγουμε εύκολα από το θέμα αυτής της διπλωματικής εργασίας. Οι παρακάτω έννοιες είναι από το πεδίο της ουράνιας μηχανικής.

Β'.2.1 Position και Velocity Vectors

Μια από της πιο σημαντικές έννοιες σε αυτή την ενότητα είναι το Διάνυσμα (Vector). Το διάνυσμα είναι ένα μαθηματικό αντικείμενο το οποίο προσδιορίζει το μέγεθος (magnitude) και την φορά του. Θα αναπαριστούμε γράφηκα το διανόημα ως ένα κατευθυνόμε βέλος. Το μήκος του βέλους είναι ανάλογο με το μέγεθος του διανύσματος. Για παραδείγματα έστω ότι ένα αεροπλάνο κινείται 720km/h βορειοδυτικά. Η κατεύθυνση του αεροπλάνου είναι βορειοδυτική και το μέγεθος του ή η ταχύτητα του είναι 720km/h . Με τον τύπο της έντονης γραφής θα ενώνουμε ότι το αντικείμενο είναι ένα διάνυσμα και με την κανονική γραφεί θα ενώνουμε το βαθμωτό μέγεθος. Δηλαδή το $\mathbf{A}$ είναι το διάνυσμα και το A είναι το βαθμωτό μέγεθος.

Τα διανύσματα έχουν την ιδιότητα όταν πολλαπλασιάσεις για παραδείγματα το διάνυσμα $\mathbf{A}$ με το αντίστροφο μέγεθος παράγεται ένα διάνυσμα το οποίο έχει κατεύθυνση προς το $\mathbf{A}$ το οποίο είναι αδιάστατο και έχει βαθμωτό μέγεθος 1. Το διάνυσμα αυτό ονομάζεται μοναδιαίο διάνυσμα και συμβολίζεται $\hat{u}_A$. Ο τύπος Β'.1 δείχνει πως υπολογίζεται.

$$\hat{u}_A = \frac{\mathbf{A}}{A} \quad (\text{B'.1})$$



Σχήμα Β'.3: Αναπαράσταση ενός διανύσματος $\mathbf{A}$ σε ένα καρτεσιανό τρισδιάστατο επίπεδο

Στο Σχήμα B'.3 παρουσιάζεται το διάνυσμα $\mathbf{A}$ τριών διαστάσεων με αρχή την αρχή των αξόνων O σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Τα διαστήματα $\mathbf{A}_x, \mathbf{A}_y, \mathbf{A}_z, \mathbf{A}_{xy}$ είναι οι κάθετες προβολές προς τους άξονες X, Y, Z και στο επίπεδο XY .

Έστω ότι $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ είναι τα μονοδιάστατα διανύσματα των αξόνων x, y και z αντίστοιχα τότε το διάνυσμα $\mathbf{A}$ μπορεί να ξαναγραφεί με την παρακάτω μορφή.

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_x \hat{i} + \mathbf{A}_y \hat{j} + \mathbf{A}_z \hat{k} \quad (\text{B'.2})$$

Από τις εξισώσεις B'.1 και B'.2 προκύπτει ότι το μοναδιαίο διάνυσμα με κατεύθυνση το $\mathbf{A}$ προκύπτει ο τύπος B'.3.

$$\hat{u}_A = \cos \theta_x \hat{i} + \cos \theta_y \hat{j} + \cos \theta_z \hat{k} \quad (\text{B'.3})$$

όπου

$$\cos \theta_x = \frac{\mathbf{A}_x}{\mathbf{A}} \quad \cos \theta_y = \frac{\mathbf{A}_y}{\mathbf{A}} \quad \cos \theta_z = \frac{\mathbf{A}_z}{\mathbf{A}} \quad (\text{B'.4})$$

Οι γωνιακές κατεύθυνσης $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ μετρώνται μεταξύ του διανύσματος $\mathbf{A}$ και τους θετικούς άξονες συντεταγμένων.

Το βαθμωτό μέγεθος του διανύσματος $\mathbf{A}$ υπολογίζεται σύμφωνα με το Πυθαγόρειο Θεώρημα B'.5. Όλα τα σημεία ενός χώρου τριών διαστάσεων για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή μπορούν να περιγράφουν με διανύσματα τριών διαστάσεων. Πρέπει να επισημάνουμε ότι τα διανύσματα έχουν ιδιότητες και πράξεις τις οποίες τις θεωρούμε δεδομένες. Για αυτό δεν θα τις αποδείξουμε άλλα θα τις αναφέρουμε ονομαστικά γιατί ξεφεύγουμε από τον κύριο στόχο αυτής τις εργασίας.

$$A = \sqrt{\mathbf{A}_x^2 + \mathbf{A}_y^2 + \mathbf{A}_z^2} \quad (\text{B'.5})$$

Ως εσωτερικό γινόμενο διανυσμάτων ορίζεται η ακόλουθη πράξη και το αποτέλεσμα τις είναι φυσικός αριθμός

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = AB \cos \theta \quad (\text{B'.6})$$

Ως εξωτερικό γινόμενο διανυσμάτων ορίζεται η παρακάτω πράξη και το αποτέλεσμα τις είναι διάνυσμα.

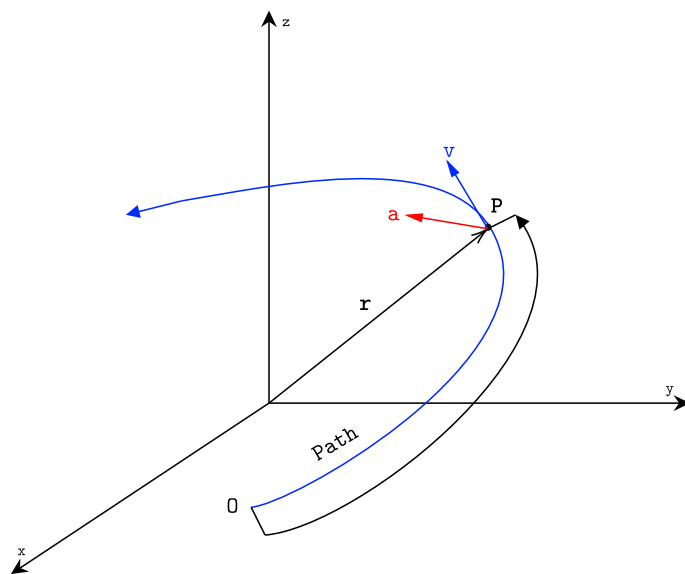
$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = AB \sin \theta \hat{n}_{AB} \quad (\text{B'.7})$$

Όπου θ η γωνία μεταξύ των διανύσματος $\mathbf{A}$ και $\mathbf{B}$ καθώς το $\hat{\mathbf{n}}_{AB}$ είναι το διάνυσμα μονάδας κανονικοποιημένο στο επίπεδο που ορίστηκε από τα δύο διανύσματα. Η κατεύθυνση του $\hat{\mathbf{n}}_{AB}$ ορίζεται από τον κανόνα δεξιού χεριού.

Για να μελετήσουμε την κίνηση ενός αντικείμενου P μέσα στο Ευκλείδειο χώρο χρειαζόμαστε ένα σύστημα αναφοράς και ένα ρολόι. Έστω ότι έχουμε ένα μη περιστρεφόμενο Καρτεσιανό Σύστημα Συντεταγμένων με τους άξονες xyz και το ρολόι που μετράει τον χρόνο t .

Δεδομένου του συστήματος αναφοράς, η θέση του αντικείμενου P κατά την χρονική στιγμή ορίζεται από το διάνυσμα θέσης ή position vector $\mathbf{r}(t)$ που εκτείνεται από την αρχή του συστήματος αναφοράς ως την θέση του αντικείμενου P όπως φαίνεται στο σχήμα Β'.4. Το $\mathbf{r}(t)$ αποτελείται από τις συντεταγμένες που έχει στους άξονες x, y, z Β'.8.

$$\mathbf{r}(t) = x(t)\hat{\mathbf{i}} + y(t)\hat{\mathbf{j}} + z(t)\hat{\mathbf{k}} \quad (\text{B'.8})$$



Σχήμα Β'.4: Αναπαράσταση ενός αντικείμενου P που κινείται στον χώρο

Η απόσταση του αντικείμενου $\mathbf{P}$ από την αρχή των αξόνων είναι το μέγεθος του διανύσματος $\mathbf{r}$ και συμβολίζεται ως $\|\mathbf{r}\|$ ή απλώς r .

$$\|\mathbf{r}\| = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (\text{B'.9})$$

Η ταχύτητα (velocity) $\mathbf{v}$ καθώς και η επιτάχυνση (acceleration) $\mathbf{a}$ του αντικειμένου είναι η πρώτη και η δεύτερη παραγωγός του Position Vector B'.10 B'.11.

$$\mathbf{v}(t) = \frac{dx(t)}{dt}\hat{\mathbf{i}} + \frac{dy(t)}{dt}\hat{\mathbf{j}} + \frac{dz(t)}{dt}\hat{\mathbf{k}} = v_x(t)\hat{\mathbf{i}} + v_y(t)\hat{\mathbf{j}} + v_z(t)\hat{\mathbf{k}} \quad (\text{B'.10})$$

$$\mathbf{a}(t) = \frac{dv_x(t)}{dt}\hat{\mathbf{i}} + \frac{dv_y(t)}{dt}\hat{\mathbf{j}} + \frac{dv_z(t)}{dt}\hat{\mathbf{k}} = a_x(t)\hat{\mathbf{i}} + a_y(t)\hat{\mathbf{j}} + a_z(t)\hat{\mathbf{k}} \quad (\text{B'.11})$$

Οι παράγωγοι των $\hat{\mathbf{i}}, \hat{\mathbf{j}}, \hat{\mathbf{k}}$ είναι μηδέν διότι οι άξονες από το Καρτεσιανό Σύστημα αναφοράς έχουν σταθερές κατευθύνσεις.

B'.2.2 Orbital Elements

Στην προηγούμενη ενότητα είδαμε πως μπορούμε να αναπαραστήσουμε ένα αντικείμενο στον τρισδιάστατο χώρο καθώς και πως μπορούμε να εξάγουμε την ταχύτητα και την επιτάχυνση από το Διάνυσμα Θέσης. Όπως είδαμε στην ενότητα B'.1 οι τροχιές μπορεί να είναι κυκλικές ή ελλειπτικές. Όπως θα δούμε οι κύλικες τροχιές είναι ειδική περίπτωση των επιληπτικών τροχιών.

Ως έλλειψη ορίζεται το γεωμετρικό σχήμα στο οποίο τα σημεία E_1 και E_2 είναι σταθερά όπου ονομάζονται εστίες (focal points). Και το σύνολο των σημείων των οποίων το άθροισμα των αποστάσεων τους από τα E_1 και E_2 είναι ίσο με $2a$ βρίσκονται πάνω σε μια καμπύλη που ονομάζεται έλλειψη με εστίες τα σημεία E_1 και E_2 .

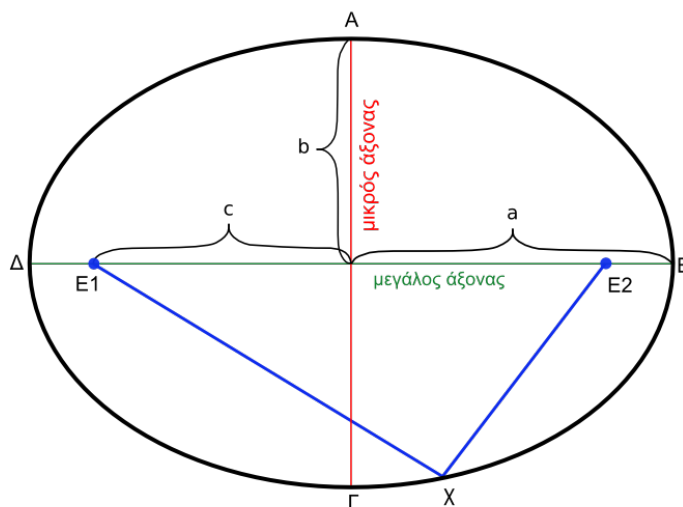
Η εξίσωση της έλλειψης σε Καρτεσιανό Σύστημα αναφοράς δίνεται από τον τύπο B'.12 και ισχύ η σχέση B'.13.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (\text{B'.12})$$

$$b^2 = a^2 - c^2 \quad (\text{B'.13})$$

Η έλλειψη έχει δυο κυρίους άξονες τον μεγάλο άξονα a (Semi major Axis) και τον μικρό άξονα b (Semi minor Axis).

Η επιμήκυνση μιας έλλειψης μετρείται με την εκκεντρικότητα (Eccentricity) της e και υπολογίζεται με τον τύπο B'.14. Η έλλειψη παίρνει τιμές για το e μεγαλύτερες του 0 και μικρότερες του 1. Στην περίπτωση που η εκκεντρικότητα είναι 0 τότε η τροχιά είναι κύκλος. Αν η εκκεντρότητα είναι ίση με 1 τότε η τροχιά είναι παράβολη και για



Σχήμα Β'.5: Αναπαράσταση της έλλειψης

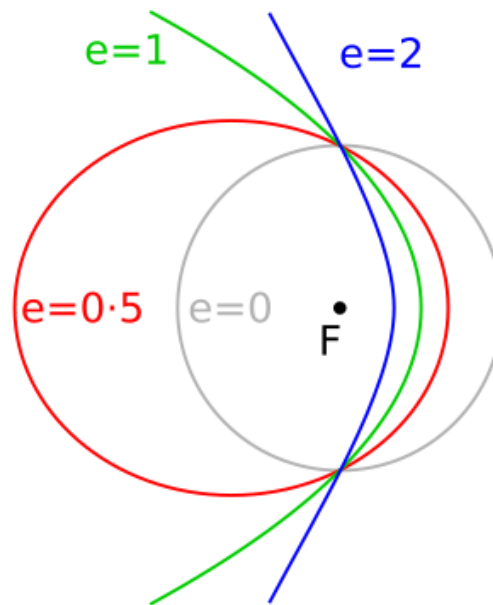
τιμές μεγαλύτερη του 1 οι τροχιές είναι υπερβολικές. Στο σχήμα Β'.6 παρουσιάζονται οι τροχιές με διαφορετική τιμή εκκεντρικότητας. Με γρύζω χρώμα και $e = 0$ παρουσιάζεται η κυκλική τροχιά. Με κόκκινο χρώμα και $e = 0,5$ η επιληπτική τροχιά. Με πράσινο χρώμα και $e = 1$ η παραβολική τροχιά. Τέλος με μπλε χρώμα και $e = 2$ η υπερβολική τροχιά. Οι τροχιές αυτές ονομάζονται Kepler Orbits προ τιμή του μεγάλου Γερμανού αστρονόμου Johannes Kepler.

$$e = \frac{c}{a} = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad (\text{B'.14})$$

Όλες οι τροχιές μπορούν να περιγράψουν μοναδικά απο τις τροχιακές παραμέτρους. Στην ουράνια μηχανική οι παράμετροι αυτοί σε ένα σύστημα δυο σωμάτων χρησιμοποιώντας της τροχιές του Kepler ονομάζονται Orbital elements. Τα Orbital elements αποτελούνται από έξι παραμέτρους στις οποίες θα αναφερθούμε παρακάτω.

Για να περιγράψουμε το μέγεθος και το σχήμα της τροχιάς χρηζόμαστε το μεγάλο άξονα a ο οποίος περιγράφει το μέγεθος και την εκκεντρότητα e η οποία θα μας δώσει το σχήμα της.

Για να περιγράψουμε το τροχιακό επίπεδο στο οποίο είναι ενσωματωμένη η τροχιακή έλλειψη θα χρειαστούμε την γωνία της Έγκλιση (Inclination) και την γωνία Ορθή Άνοδος του Ανοδικού Κόμβου ή Longitude of the Ascending Node. Η γωνία της Έγκλισης συμβολίζεται με i και σχηματίζεται μεταξύ του επίπεδου αναφοράς που στην



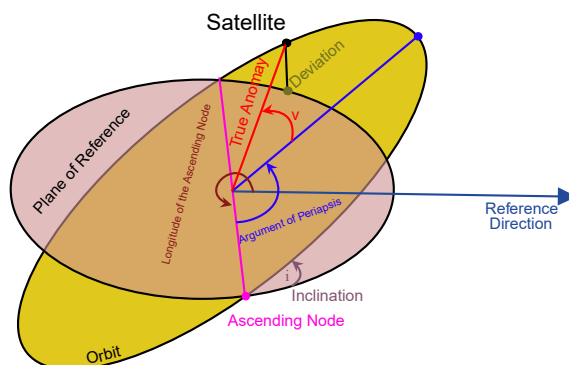
Σχήμα Β'.6: Αναπαράσταση των Kepler Orbits

συγκρινόμενη περίπτωση είναι ο ισημερινός της Γης και του τροχιακού επίπεδου.

Η τομή του επιπέδου αναφοράς με το τροχιακό επίπεδο δημιουργεί μια ευθεία από τον Καθοδικό κόμβο προς τον Ανοδικό κόμβο (Ascending Node). Ο Καθοδικός κόμβος είναι το σημείο του επιπέδου του ισημερινού από το οποίο περνά ο δορυφόρος κινούμενος από βορά προς νότο. Ενώ αντίστοιχα ο Ανοδικό κόμβο είναι το σημείο του αντικειμένου που κινείται από τον νότο προς τον βορά. Η ευθεία αυτή παρουσιάζεται με χρώμα μοβ από τον καθοδικό προ τον ανοδικό κόμβο στο σχήμα Β'.7. Το ίχνος του δορυφόρου από το τροχιακό επίπεδο προ το επίπεδο αναφοράς δημιουργεί ένα σημείο το οποίο ονομάζεται απόκλιση (Deviation). Η γωνία που σχηματίζει ο άξονας αναφοράς με τον ανοδικό κόμβο ονομάζεται γωνία Ορθής Άνοδους του Ανοδικού Κόμβου και συμβολίζεται με το Ω .

Το Όρισμα του Περιγείου ή Argument of Perigee είναι η παράμετρος η οποία προσδιορίζει τον προσανατολισμό της τροχιάς στο τροχιακό επίπεδο. Ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του Ανοδικού Κόμβου και της διεύθυνσης του Περιγείου και συμβολίζεται με το ω . Το Περιγείο είναι το σημείο τις τροχιάς το οποίο έχει την μικρότερη απόσταση από το σώμα στο οποίο περιστρέφεται. Στο σχήμα Β'.7 το σημείο αυτό περιγράφεται με μπλε χρώμα.

Τέλος η Αληθής ανωμαλία (True Anomaly) περιγράφει την θέση αντικειμένου



Σχήμα Β'.7: Αναπαράσταση των Kepler Orbits

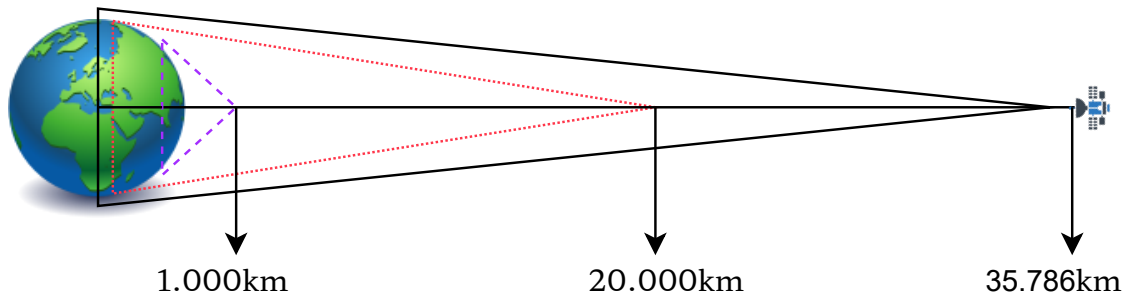
στην τροχιά. Ορίζεται ως η γωνιά μεταξύ τις διεύθυνσης του Περιγείου και της τωρινής θέσης που βρίσκεται το αντικείμενο και συμβολίζεται με ν . Στο σχήμα Β'.7 παρουσιάζονται όλες οι παράμετροι οι οποίες μπορούν να περιγράψουν μια τροχιά.

Μέσο των Orbital elements μπορούμε να υπολογίσουμε την ακριβή θέση του αντικείμενου πάνω στην τροχιά που διανύει. Υπάρχουν αρκετοί μέθοδοι τους οποίους μπορούμε να ακολουθήσουμε ώστε να μετατρέψουμε τα Orbital elements σε διανύσματα θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης. Ακολουθώντας τα βήματα των αλγορίθμων από την εργασία [18], ο αλγόριθμος 4.5 από το βιβλίο [19] τα οποία αναφέρονται μόνο για λόγους πληρότητας. Έχουν παραλυθεί αρκετές σημαντικές ενότητες όπως οι νόμοι του Kepler για την κινήσεις των ουράνιων σωμάτων, το πρόβλημα των δυο σωμάτων. Οι εξισώσεις του Νεύτωνα για την μάζα, της δύναμης και την βαρύτητα. Καθώς και άλλες ενότητες από την ουράνια μηχανική διότι όπως έχουμε αναφέρει ξεφεύγουμε από το κύριο θέμα αυτής της εργασίας.

Β'.2.3 Satellite Footprint

Όπως είδαμε από τις προηγούμενες ενότητες όσο αυξάνεται το υψόμετρο ενός δορυφόρου τόσο αυξάνεται και η κάλυψη της Γης. Η κάλυψη της Γης από τον δορυφόρο είναι γνωστή ως αποτύπωμα (Footprint). Στο σχήμα Β'.8 παρουσιάζεται η καλύψει από τους δορυφόρους που βρίσκονται σε τροχιά MEO, LEO και GEO. Όπως θα δούμε αυτή η περιοχή μπορεί να υπολογιστεί εύκολα με τριγωνομετρικές πράξεις.

Για τον υπολογισμό χρειάζεται να ορίσουμε δυο νέα μεγέθη την Εμβέλεια Κλίσης (Slant Range) και την γωνιά ανύψωσης (Elevation Angle). Ως Εμβέλεια Κλίσης ορίζεται η απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και του σημείου που βρίσκεται ο επίγειος



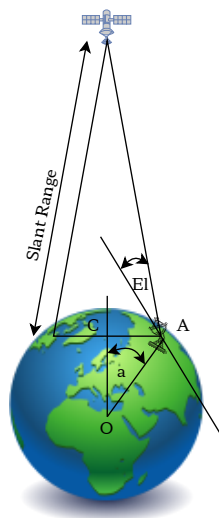
Σχήμα B'.8: Αναπαράσταση της κάλυψης της Γης από τον δορυφόρο σε διαφορετικά υψόμετρα.

σταθμός όπου η απόσταση αυτή συμβολίζεται με D . Η γωνία ανύψωσης είναι η γωνία που μετρείται προς τα επάνω από το τοπικό οριζόντιο επίπεδο του επίγειου σταθμού μέχρι τη διαδρομή του δορυφόρου και την συμβολίζουμε με El . Τέλος η κεντρική γωνία κάλυψης σχηματίζεται μεταξύ των ευθειών επίγειου σταθμού με το κέντρο της Γης και της ευθείας που δημιουργείτε από το κέντρο της Γης προς τον δορυφόρο. Η κεντρική γωνία κάλυψης χρησιμοποιείτε για τον υπολογισμό της απόστασης της Εμβέλεια Κλίσης. Στο σχήμα B'.9 παρουσιάζονται τα προηγούμενα μεγέθη. Οι εξισώσεις B'.15 και B'.16 παρουσιάζουν πως μπορούν να υπολογιστούν η απόσταση της Εμβέλεια Κλίσης και η κεντρική γωνία κάλυψης. Οπού R η περίμετρος της Γης, H η απόσταση του δορυφόρου από την επιφάνεια της θάλασσας και El η γωνία ανύψωσης.

$$D = \sqrt{R^2 + (R + H)^2 - 2R(R + H) \sin \left[El + \sin^{-1} \left\{ \left(\frac{R}{R + H} \right) \cos El \right\} \right]} \quad (B'.15)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left\{ \left(\frac{R}{R + H} \right) \cos El \right\} \quad (B'.16)$$

Για να υπολογίσουμε την περιοχή που καλύπτετε από τον δορυφόρο χρειάζεται να υπολογίσουμε την κεντρική γωνία κάλυψης B'.16. Από το τρίγωνο OAC οποίο σχηματίζεται μεταξύ του κέντρου της Γης, του επίγειου σταθμού και την τομή του σημείου C από τον κάθετο άξονα της Γης αν φέρουμε την παράλληλη ευθεία προς τον Ισημερινό από θέση του επίγειου σταθμού. Η πλευρά του τριγώνου υπολογίζεται με τον τύπο B'.17 όπου το OA είναι η ακτίνα της Γης. Τέλος η περιοχή που καλύπτετε δίνεται από τον τύπο B'.18 [20].



Σχήμα Β'.9: Αναπαράσταση των γωνιών ανύψωσης και της κεντρικής γωνίας κάλυψης καθώς και τις απόστασης Εμβέλειας Κλίσης .

$$OC = OA \sin(a + El) \quad (B'.17)$$

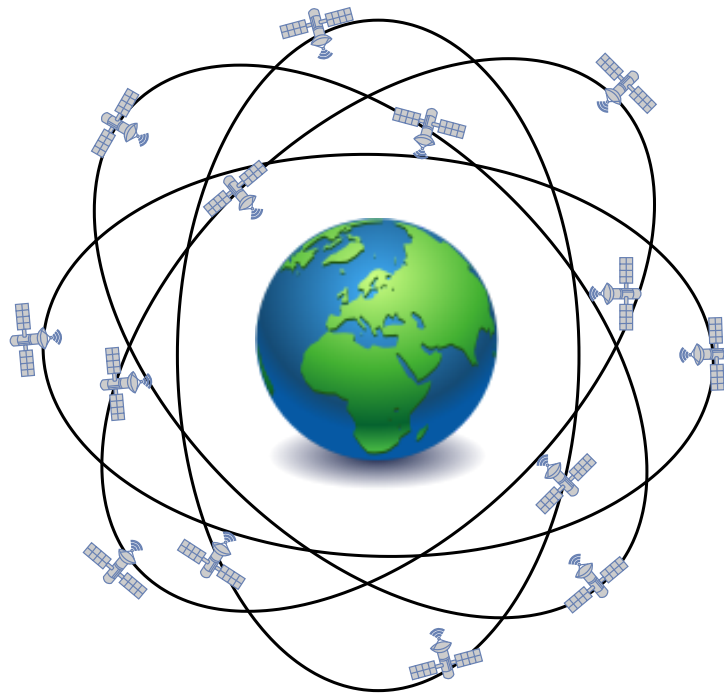
$$Area = 2\pi R(R - OC) \quad (B'.18)$$

Αναφέρεται ότι έχει γίνει αρκετή έρευνα στο πως θα μεγιστοποιηθεί η κάλυψη από τα δορυφορικά δίκτυα με διαφορετικές τοπολογίες αξιοποιώντας καλύτερα τα χαρακτηριστικά των δορυφορικών τηλεπικοινωνιών. Οι ερευνητές στο [21] εξέτασαν πως η τοπολογία επηρεάζει την απόδοση του δικτύου εξετάζοντας δυο διαφορετικά δορυφορικά δίκτυα το Iridium και το LEONET. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τους LEO [22, 23, 24, 25] δορυφόρους και την κάλυψη που παρέχουν διότι όλο και περισσότερες εταιρίες αποφασίζουν να χρησιμοποιήσουν αυτές τις τροχιές λόγω του μειωμένου κόστους και του χαμηλού delay.

B'.3 Satellite Constellation

Είδαμε από τις προηγούμενες ενότητες ότι μόνο ένας δορυφόρος δεν μπορεί να παρέχει παγκόσμια κάλυψη. Για να προσπεραστεί αυτό το εμπόδιο χρησιμοποιούνται οι Δορυφορικοί Σχηματισμοί (Satellite Constellation). Ως Satellite Constellation ορίζεται οι

δορυφόροι οι οποίοι δουλεύουν μαζί ως ένα σύστημα το οποίο προσφέρει παγκόσμια κάλυψη ή σχεδόν παγκόσμια κάλυψη. Έτσι ώστε σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή σε οποιαδήποτε σημείο στον κόσμο να μπορεί να κάλυπτε τουλάχιστον από έναν δορυφόρο. Συνήθως οι δορυφόροι τοποθετούνται ανά ομάδες σε διαφορετικά Orbital Planes και κατανέμονται γύρο από την Γη.



Σχήμα B'.10: Σχηματική αναπαράσταση ενός υποθετιμένου Satellite Constellation

Από του πρώτους Satellite Constellation θεωρείτε οι δορυφόροι που σχηματίζουν τον Molniya Constellation τους οποίους έθεσαν σε τροχιά το 1965 η Σοβιετική Ένωση για τηλεπικοινωνιακή και στρατιωτική χρήση [26].

Το Iridium Communication είναι ένα από τα πιο γνωστά δορυφορικά συστήματα τα οποία ήταν διαθέσιμα για την παροχή τηλεπικοινωνιών προς τους καταναλωτές. Η πρώτη γενιά αποτελούταν από 66 δορυφόρους χωρισμένοι σε 6 Orbital Planes [27, 28] τοποθετημένοι σε LEO τροχιά την περίοδο 1997 – 2002 οι όποιοι έμειναν σε λειτουργία έως το 2017. Το 2017 ξεκίνησε η δεύτερη γένια που ονομάστηκε Iridium Next και αποτελείτε από 81 καινούριους δορυφόρους. Οι υπηρεσίες τις οποίες παρείχε το

σύστημα ήταν δορυφορικά τηλεφώνα που μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν οπουδήποτε στον κόσμο, Modules τα οποία τα διέθεταν προς βιομηχανική χρήση σε τρίτες εταιρίες και τέλος Data Terminals που πρόσφεραν Broadband υπηρεσίες [29].

Υπάρχουν πολλά σύστημα τα οποίο προσφέρουν δορυφορικές τηλεπικοινωνίες όπως το Globalstar, Orbvomm, OneWeb ,SES και πολλά άλλα. Οι υπηρεσίες του Orbvomm επισημοποιούνται για επικοινωνίες μεταξύ μηχανών δηλαδή Machine to Machine (M2M).

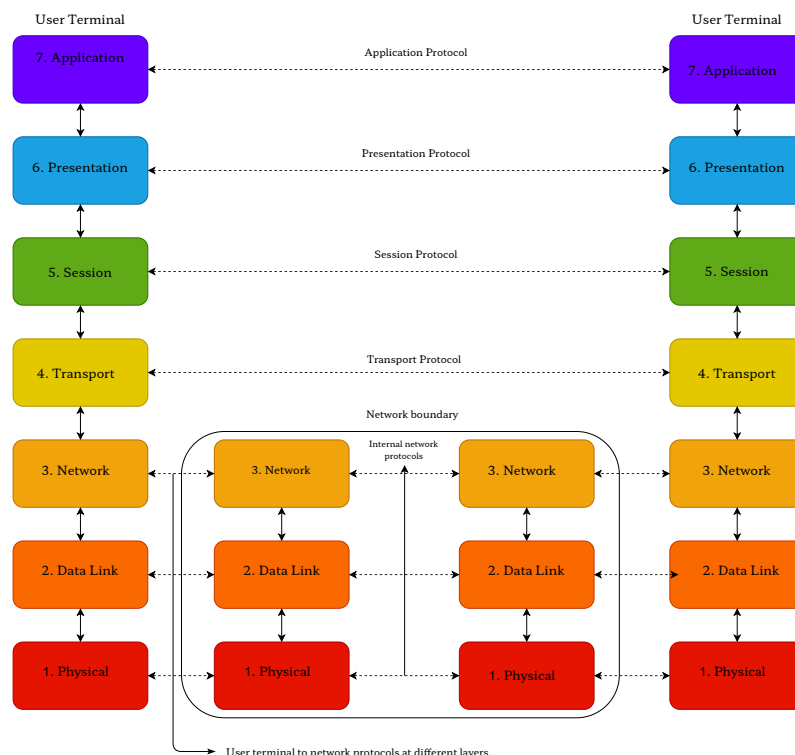
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει το σύστημα Starlink από την SpaceX. Το Starlink στην πρώτη φάση χρησιμοποιεί 1.440 δορυφόρους σε 72 Orbital Planes, και κάθε plane αποτελείται 20 δορυφόρους . Είναι τοποθετημένοι σε LEO τροχιά σε υψόμετρο 540km πάνω από την επιφάνεια της θάλασσα και με Inclination 53°. Το Starlink βρίσκεται ακόμα σε Beta πρόγραμμα άλλα προσφέρει Internet σε διάφορες χώρες όπως τον Καναδά, στις Η.Π.Α, στην Πορτογαλία καθώς και άλλες χώρες στην υδρόγειο. Σύμφωνα με την έρευνα [30] το Starlink στο πρόσσεχες μέλλον θα αποτελείτε από 11.000 – 12.000 δορυφόρους και θα μιλάμε για Mega Constellations το οποίο θα περιέχει διάφορα *Shell*. Παρόλο που είναι σε Beta πρόγραμμα προσφέρει από 50 – 150Mb/s download speed και delay από 20 – 40ms.

Β'.4 Ανάλυση των επίπεδων των δορυφορικών επικοινωνιών

Σε αυτήν την ενότητα θα αναλύσουμε τα χαρακτηριστικά που έχουν οι δορυφορικές τηλεπικοινωνίες. Πιο συγκριμένα τα 7 επίπεδα (layers) του OSI (Open Systems Interconnection) στάνταρ για τους δορυφόρους. Το OSI στάνταρ είναι εννοιολογικό μοντέλο το οποίο περιγράφει χαρακτηριστικά και τυποποιεί τις λειτουργίες των επικοινωνιών χωρίς να περιγράφει την εσωτερική δομή τους και την τεχνολογία που χρησιμοποιούν.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να ορίσουμε την έννοια του πρωτοκόλλου. Το πρωτόκολλο είναι κανόνες και συμβάσεις που επισημοποιούνται για επικοινωνία κατόπιν συμφωνίας μεταξύ των μερών - οντοτήτων που θέλουν να επικοινωνήσουν. Ένα μοντέλο αναφοράς παρέχει όλους τους ρόλους έτσι ώστε όλοι οι διαπλεκόμενοι να μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους αν ακολουθήσουν του ρόλους που έχουν οριστεί από το μοντέλο αναφοράς στην δικιά τους υλοποίηση του πρωτοκόλλου. Για να περιοριστεί η πολυπλοκότητα όλη η λειτουργικότητα του συστήματος χωρίζεται σε layers.

Κάθε layer σχεδιάζεται έτσι ώστε να προσφέρει συγκεκριμένες λειτουργικότητες στα υψηλότερα layers. Με αυτόν τον τρόπο τα κρύβονται οι λεπτομέρειες στο πως έχουν υλοποιηθεί οι λειτουργικότητες. Κάθε layer προσφέρει μια διεπαφή (Interface) με βασικές λειτουργικότητες οι οποίες χρησιμοποιούνται για να αποκτήσουν πρόσβαση στις υπηρεσίες που προσφέρονται. Η αρχιτεκτονική των δικτυακών πρωτοκόλλων αποτελείται από ένα σύνολο layer και πρωτοκόλλων.



Σχήμα Β'.11: OSI layers

Το protocol stack είναι μια λίστα από πρωτοκόλλα πιο συγκεκριμένα ένα πρωτόκολλο ανά layer. Οι ομότιμες οντότητες είναι οντότητες που βρίσκονται στο ίδιο layer και είναι ικανές να επικοινωνούν με το ίδιο πρωτόκολλο. Τα πρωτοκόλλα περιγράφουν στάνταρ τα οποία είναι μέρος του μοντέλου αναφοράς. Στο σχήμα Β'.11 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική OSI καθώς και οι σχέσεις μεταξύ των layers.

Η αρχιτεκτονική OSI ήταν από τις πρώτες που αναπτύχθηκαν ως διεθνείς πρότυπο. Παρακάτω συνοψίζουμε τις αρχές τις οποίες εφαρμόστηκαν και στα 7 layers:

- Το layer ορίζει ένα επίπεδο αφαιρετικότητας το οποίο θα πρέπει να είναι διαφορετικό από τα υπόλοιπα layer.

- Κάθε layer εκτελεί μια καλά καθορισμένη λειτουργία
- Η λειτουργικότητα του κάθε layer θα πρέπει να οδηγεί σε διεθνή στάνταρ
- Τα όρια των layers θα πρέπει να επιλέγονται έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί την ροή των πληροφοριών σε όλη την διεπαφή.
- Ο αριθμός των layers θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος έτσι ώστε να περιλαμβάνει όλες τις ξεχωριστές λειτουργικότητες αλλά όχι πολύ μεγάλος γιατί θα είναι αρκετά πολύπλοκο.

Στις επόμενες υπό ενότητες θα δούμε αναφορικά τα χαρακτηριστικά των δορυφορικών επικοινωνιών.

Physical layer

Το φυσικό επίπεδο (Physical layer) είναι το πρώτο layer στην αρχιτεκτονική OSI το οποίο καθορίζει μηχανισμούς, ηλεκτρικές και διεπαφές διαδικασίας καθώς και το φυσικό μεσώ μετάδοσης του σήματος. Στα δορυφορικά δίκτυα οι ραδιοφωνικοί συνδεδεμένοι (Radio links) είναι το φυσικό μεσώ μετάδοσης. Η πολυπλεξία και κωδικοποίηση των καναλιών επιτρέπουν την ροή της πληροφορίας να μεταδοθεί μέσω καθορισμένων σημάτων και κατανεμημένες ζώνες συχνοτήτων.

Data Link layer

Το επίπεδο σύζευξης δεδομένων ή Data Link layer προσφέρει μια γραμμή αναφοράς προς τις δικτυακές οντότητες οι οποίες είναι ανίκανες να ανιχνεύσουν σφάλματα κατά την μετάδοση της πληροφορίας στο δικτυακό επίπεδο Network layer. Τα μέσα μετάδοσης έχουν ένα επιπλέον πρόβλημα στο Data link επίπεδο ότι με κάποιον τρόπο θα πρέπει ελέγξουν την πρόσβαση στο κοινό μεσώ μετάδοσης. Υπάρχει μια ιδιική υποκατηγορία που ονομάζεται medium access control (MAC) όπου χρησιμοποιούν τεχνικές όπως Aloha, FDMA, TDMA, CDMA, DAMA, Polling που αντιμετωπίζουν αυτό το πρόβλημα.

Network layer

Στο δικτυακό επίπεδο (Network layer) καθορίζει τις διαδρομές των πακέτων από τον αποστολέα προς τον παραλήπτη. Σε αυτή την λειτουργία εντάσσονται ο διαμοιρασμός

διευθύνσεων, έλεγχος συμφόρησης, πιθανές κατατμήσεις και αποτμηματοποιήσεις, συνεργασία με διαφορετικούς τύπους πρωτοκόλλων και τεχνολογιών.

Transport layer

Επίπεδο μεταφοράς ή Transport layer είναι υπεύθυνο για την αξιοπιστία των δεδομένων που παρέχονται στα υψηλότερα layers. Το Transport layer είναι το υψηλότερο επίπεδο το προσφέρει υπηρεσίες επικοινωνίας. Τα επόμενα επίπεδα ασχολούνται με τα δεδομένα του χρήστη. Το Transport layer προσφέρει λειτουργικότητες όπως τα δεδομένα να πηγαίνουν στα υψηλότερα επίπεδα με την σωστή σειρά που τα έστειλε το Application layer, ελέγχει για σφάλματα, καθορίζει την ροή των δεδομένων και τον έλεγχο της συμφόρησης. Το UDP και το TCP όπως θα δούμε στα παρακάτω κεφαλαία αποτελούν τα πιο γνωστά πρωτοκόλλα μεταφοράς.

Session layer

Το επίπεδο συνοδού (Session layer) παρέχει τις λειτουργικότητες και τα μέσα στις Presentation οντότητες να οργανώνονται και παράλληλα συγχρονίζουν το διάλογο μεταξύ τους. Επίσης διαχειρίζονται την ανταλλαγή των δεδομένων στην τελική συσκευή του χρήστη.

Presentation layers

Το επίπεδο παρουσίασης (Presentation layers) μετασχηματίζει τα δεδομένα από το προηγούμενο επίπεδο στην μορφή που αναμένει το Application. Επίσης σε αυτό το επίπεδο εφαρμόζεται η κρυπτογράφηση και συμπίεση των δεδομένων.

Application layer

Το επίπεδο εφαρμογών ή Application layer είναι το πιο υψηλό επίπεδο στην αρχιτεκτονική OSI. Το επίπεδο αυτό προσφέρει υπηρεσίες όπως μεταφορά αρχείων, αποστολή email και υπηρεσίες διαδικτύου. Μερικά παραδείγματα εφαρμογών File Transfer Protocol (FTP), Telnet, Simple Mail Transfer Protocol (SMTP), http καθώς και πολλές άλλες.

Β'.5 Τύποι δορυφορικών δικτύων

Υπάρχουν δυο διαφορετικές τεχνολογίες μετάδοσης το Broadcast και Point to Point [31]. Τα δορυφορικά δίκτυα έχουν νόημα και είναι ιδιαίτερα χρήσιμα όταν θέλουμε καλύψουμε μεγάλες περιοχές της Γης χρησιμοποιώντας Broadcast μεταδόσεις. Ωστόσο υπάρχουν τρεις διαφορετικούς ρόλους που μπορούν να έχουν οι δορυφόροι στα δίκτυα.

Πρώτον στα Access Networks οι χρήστες έχουν πρόσβαση από τον τερματικό τους κόμβο στον κόμβο που συνδέεται ο δορυφόρος ώστε να έχουν απευθείας πρόσβαση σε δορυφορική σύνδεση. Για παράδειγμα ένας χρήστης μπορεί να συνδεθεί στο διαδίκτυο και να στείλει ένα email χρησιμοποιώντας δορυφορικά συστήματα broadband.

Δεύτερον τα Transit Network προσφέρουν συνδέσεις μεταξύ δικτύων και υποστηρίζουν τεράστιο αριθμό συνδέσεων για τον μεγάλο όγκο κίνησης που δημιουργούνται μέσα από τα δίκτυα. Ο χρήστης δεν έχει άμεση πρόσβαση στον δορυφόρο. Ωστόσο ενδέχεται να καταλάβει ότι η σύνδεση του περνάει μέσα από δορυφορικό δίκτυο λόγω του propagation delay ή της ποιότητας της σύνδεσης. Για παράδειγμα η χρήση του δορυφόρου σε Transit Network περιλαμβάνει την διασύνδεση των τηλεφωνικών δικτύων με broadband τεχνολογίες διαδικτύου ως backbone δίκτυα. Σε αυτές τις περιπτώσεις το διαθέσιμο bandwidth είναι προϋπολογισμένο χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως Fixed Assignment Multiple Access (FAMA).

Τρίτων έχουμε τα Broadcast Network όπου οι διάφοροι υποστηρίζουν τηλεπικοινωνιακές και Broadcast υπηρεσίες. Οι δορυφόροι είναι αρκετά αποδοτικοί σε Broadcast υπηρεσίες που περιέχουν ήχο και εικόνα. Το στάνταρτ το οποίο έχει αναπτυχθεί ονομάζεται DVB-S και είναι συντομογραφία από το Digital Video Broadcasting - Satellite, τώρα βέβαια είμαστε στην δεύτερη γενιά το DVB-S2.

Όλες οι παραπάνω κατηγορίες χρησιμοποιούν τις ίδιες βασικές αρχές για μεταδώσουν την πληροφορία από τον επίγειο σταθμό στον δορυφόρο και το αντίστροφο. Παρακάτω θα δούμε το εύρος των συχνοτήτων και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την μετάδοση του σήματος.

Β'.5.1 Communication Bands

Οι δορυφορικές επικοινωνίες τα τελευταία χρονιά έχουν αναπτυχθεί αρκετά επειδή οι δορυφόροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αστρονομία, στην προβλέψη του καιρού, για broadcast καθώς και σε πολλές άλλες εφαρμογές. Οι συχνότητες που χρησιμοποιούν στο bandwidth είναι από τους πιο σημαντικούς πόρους που διαθέτουν τα

δορυφορικά δίκτυα. Το εύρος των συχνοτήτων ξεκινάει περίπου από τα $3kHz$ μέχρι τα $300GHz$. Οι επικοινωνίες σε συχνότητες μεγαλύτερες $60GHz$ δεν είναι ιδιαίτερα πρακτικές επειδή χρειάζονται μεγάλη ποσότητα ενεργείας καθώς και το κόστος των συσκευών είναι ιδιαίτερα ακριβό. Στον πίνακα B'.1 παρουσιάζονται οι ζώνες συχνοτήτων [32].

Satellite Bands	
Ονομασία	Ζώνες συχνοτήτων (GHz)
UHF	0,3 – 1,0
L band	1,0 – 2,0
S band	2,0 – 4,0
C band	4,0 – 8,0
X band	8,0 – 12,0
Ku band	12,0 – 18,0
K band	18,0 – 27,0
Ka band	27,0 – 40,0

Πίνακας B'.1: Πίνακας συχνοτήτων

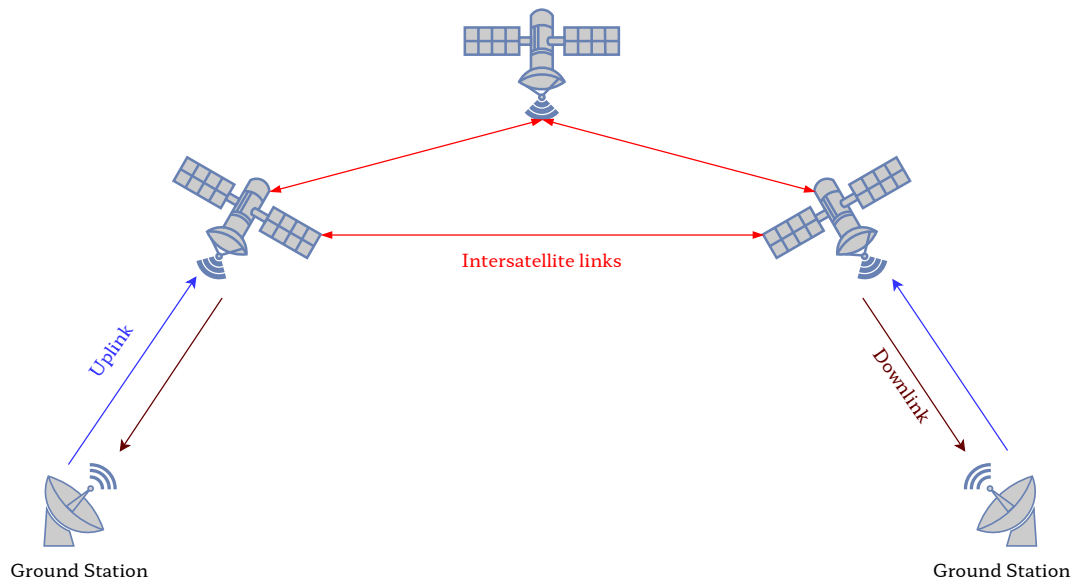
Πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω του περιβάλλοντος μεταξύ των δορυφόρων και των επιγείων σταθμών οι επικοινωνίες αντιμετωπίζουν παρεμβολές. Οι παρεμβολές μπορεί να οφείλονται στην βροχή, στα σύννεφα στις ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες από τον ήλιο καθώς και πολύ άλλοι παράγοντες μπορούν να επιδράσουν σε αυτό την αποδοχή τους. Έχει γίνει αρκετή ερεύνα στο πως μπορεί να μειωθούν οι παρεμβολές με διάφορες τεχνικές ενδεικτικά αναφέρονται οι επόμενες εργασίες [33, 34, 35, 36, 37].

B'.5.2 Ψηφιακές Τηλεπικοινωνίες

Σε αυτήν την ενότητα θα μιλήσουμε για τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται στα σήματα για να μεταδοθούν σε μεγάλες απόστασεις μέσω των δορυφορικών καναλιών. Οι δορυφόροι για να επικοινωνήσουν μεταξύ τους χρησιμοποιούν Inter-satellite links (ISL). Για να επικοινωνήσει ο επίγειος σταθμός με τον δορυφόρο χρησιμοποιεί το Uplink. Ενώ για να επικοινωνήσει ο δορυφόρος με το επίγειο σταθμό χρησιμοποιεί το Downlink.

Τα Uplinks και Downlinks αποτελούνται από ραδιοφωνικές συχνότητες που χρησιμοποιούν πολυπλεξία, ενώ τα ISL μπορούν να είναι ραδιοφωνικά ή οπτικά σήματα.

Στο σχήμα Β'.12 παρουσιάζονται οι συνδέσεις μεταξύ των δορυφόρων και των επιγείων σταθμών.

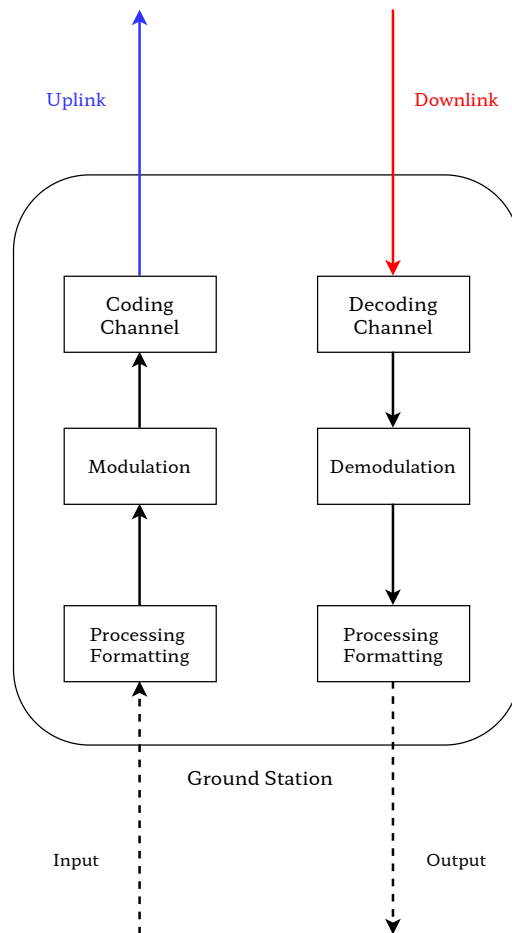


Σχήμα Β'.12: Σχηματική αναπαράσταση των δορυφορικών καναλιών.

Πριν το σήμα μεταδοθεί από τον επίγειο σταθμό προς το δορυφόρο άλλα και το αντίστροφο το σήμα θα πρέπει να περάσει από τρία διαφορετικά στάδια. Αναφορικά τα στάδια είναι το Formating Processing, το Modulation και η κωδικοποίηση του καναλιού Code Channel. Στο σχήμα Β'.13 παρουσιάζονται οι σχέσεις που έχουν μεταξύ τους και θα αναφερθούν στις επόμενο υπό ενότητες.

Formating Processing

Στο Formating Processing εφαρμόζονται δυο διαφορετικές τεχνικές. Η κρυπτογράφηση εφαρμόζεται για να αποτρέψει την μη εξουσιοδοτούμενη χρήση χρηστών ή την παραποίηση των μηνυμάτων που θα σταλθούν. Η κρυπτογράφηση γίνεται από αλγόριθμους οι οποίοι κρυπτογραφούν την πληροφορία bit by bit από την πηγή. Το σύνολο όλων των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την κρυπτογράφηση της πληροφορίας ονομάζονται κλειδί. Δηλαδή με το κλειδί θα γίνεται η κρυπτογράφηση άλλα και η αποκρυπτογράφηση της πληροφορίας. Συνήθως το κλειδί είναι διαμοιρασμένο στις



Σχήμα Β'.13: Σχηματική αναπαράσταση της αφαιρετικής αρχιτεκτονικής των επίγειων σταθμών

οντότητες που θέλουν να επικοινωνήσουν. Σύμφωνα με την παρακάτω ερεύνα [38] εφαρμόζονται δυο τεχνικές το stream ciphering και το block ciphering.

Η δεύτερη τεχνική που εφαρμόζεται είναι το Scrambling το οποίο εφαρμόζεται στο αναλογικό σήμα πριν πέραση στην πολύπλεξη. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται προσθέτοντας ή αλαλάζοντας συγκεκριμένα μέρη από το πρωτότυπο σήμα έτσι ώστε να είναι πιο δύσκολη η εξαγωγή της πληροφορίας. Η αντίστροφη διαδικασία αφού έχει περάσει το σήμα από αποπολυπλεξία (Demodulation) ονομάζεται descrambling [39].

Modulation

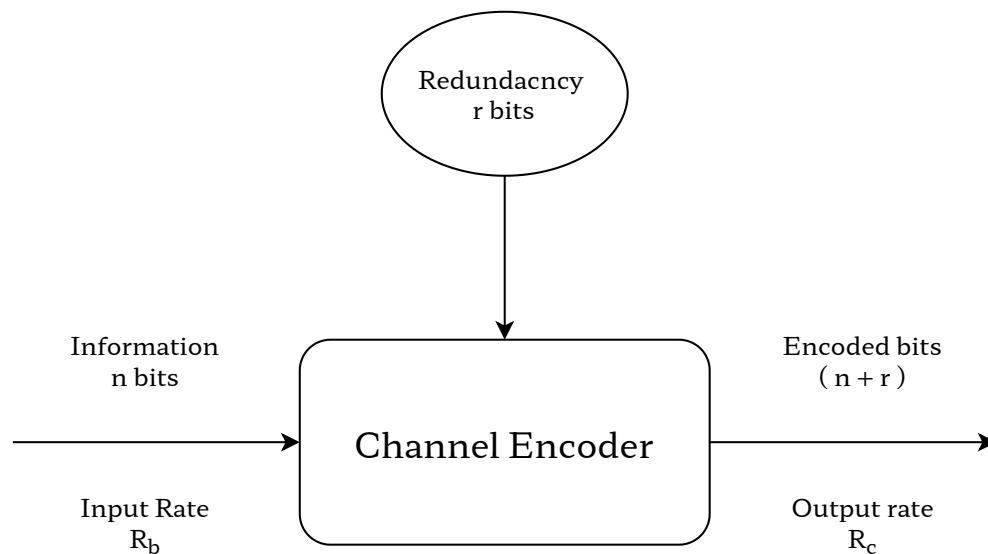
Πολύ σημαντικό ρόλο στις τηλεπικοινωνίες έχουν οι τεχνικές τις πολυπλεξίας (Modulation) . Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται για τον αποδοτικό διαμοιρασμό και την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών σημάτων πάνω από το κοινό φυσικό μέσο. Οι δυο βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στο φυσικό μεσώ είναι η πολυπλεξία με τη διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiplexing, FDM) και η πολυπλεξία με τη διαίρεση χρόνου (Time Division Multiplexing, TDM). Η χρήση των τεχνικών FDM διαχωρίζουν το πεδίο των συχνοτήτων ενώ οι TDM διαχωρίζουν το πεδίο του χρόνου για να μεταδώσουν τα σήματα. Η αντίστροφη διαδικασία ονομάζεται αποπολυπλεξία.

Όπως η πολυπλεξία μπορεί να εφαρμοσθή στο φυσικό μεσώ έτσι μπορεί να εφαρμοστεί και στην πληροφορία. Υπάρχουν πολλά είδη πολυπλεξίας. Οι πιο βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στις δορυφορικές επικοινωνίες είναι η Phase Shift Keying (PSK), Frequency Shift Keying (FSK), και ανάλογα με τον αριθμό των bits που χρησιμοποιούνται για κάθε σύμβολο είναι τα M-ary Phase Shift Keying (MPSK). Η πιο απλή τεχνική πολύπλεξης είναι των δυο καταστάσεων και ονομάζεται Binary Phase Shift Keying. Των τεσσάρων καταστάσεων ονομάζεται Quadrature Phase Shift Keying τέλος για καταστάσεις μεγαλύτερες του τέσσερα η ονομασία τους εξαρτάτε από τον αριθμό των συμβόλων και έχουμε 8PSK, 16PSK

Η επιλογή τις κατάλληλης τεχνικής πολυπλεξίας εξαρτάτε από πολλούς παραγόντες. Όπως η ισχύ του σήματος, τον θόρυβο, την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, τις παραμορφώσεις που έχει το σήμα κατά την ψηφιακή επεξεργασία. Αρχετοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με το συγκεκριμένο πρόβλημα στις δορυφορικές επικοινωνίες ενδεικτικά όπως [40, 41, 42].

Code Channel

Τέλος έχουμε την κωδικοποίηση του καναλιού (Code Channel) . Το οποίο έχει ως στόχο την προσθήκη προσθετής πληροφορίας (bits), η περιττή πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί από αυτόν που θα δεχθεί το μήνυμα για να βρει και να διορθώσει τα σφάλματα που μπορεί να έχουν δημιουργηθεί. Η τεχνική αυτή ονομάζεται Forward Error Correction (FEC) και είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στις δορυφορικές επικοινωνίες.



Σχήμα B'.14: Σχηματική αναπαράσταση του κωδικοποιημένου καναλιού

Ο ρυθμός κωδικοποίησης ορίζεται ως:

$$\rho = \frac{n}{n + r} \quad (\text{B'.19})$$

όπου το r είναι ο αριθμός των επιπρόσθετων bits και n ο αριθμός των bits της πληροφορίας. Ο ρυθμός μετάδοσης των bits κατά την έξοδο είναι μεγαλύτερος ή ίσος με το ρυθμό εισόδου τότε:

$$R_c = R_b / \rho \quad (\text{bit/s}) \quad (\text{B'.20})$$

Χρησιμοποιούνται αρκετές τεχνικές κωδικοποίησης, δυο είναι οι κυριότερες Block encoding και Convolutional encoding. Οι Block encoding τεχνικές χρησιμοποιούν τα r bits τις πλεονάζουσες πληροφορίας και κωδικοποιούν κάθε block πληροφορίας ανεξάρτητα από τα προηγούμενα. Ο κώδικας παράγεται από τον γραμμικού συνδυασμό

των bits της πληροφορίας με το αντίστοιχο block. Κύκλοι κώδικες είναι πιο συνηθισμένα όπως οι Reed–Solomon και οι Bose, Chaudhari, Hocquenghem (BCH code) , Hamming κώδικες και Golay.

Η κατηγορία των Convolutional encoding παράγει $(n + r)$ bits από τα $N - 1$ προηγούμενα πακέτα με n bits πληροφορία. Το αποτέλεσμα του γινόμενου $N(n + r)$ ορίζει το περιοριστικό μήκος του κωδικά. Ο κωδικοποιητής αποτελείτε από καταχωριστές ολίσθησης και αθροιστές του τύπου *XOR*.

Η επιλογή της κωδικοποίησης εξαρτάται από την έξοδο της αποπολύπλεξης. Η κατανομή των σφαλμάτων εξαρτάτε από τον θόρυβο και τις παρεμβολές που έχει το δορυφορικό κανάλι. Συνήθως όταν έχουμε θόρυβο Gauss και σταθερές συνθήκες διάδοσης χρησιμοποιούνται τεχνικές Block encoding. Σε συνθήκες όπου έχουμε πολλαπλές διακοπές στο μέσο διάδοσης τα σφάλματα συμβαίνουν σε ριπές και χρησιμοποιούνται τις τεχνικές Convolutional encoding επειδή είναι λιγότερο ευαίσθητες σε σχέση με τις Block encoding τεχνικές [43, 44].

Κεφάλαιο Γ΄

Transport Protocols

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσουμε και θα αναλύσουμε τα πρωτοκόλλα μεταφοράς. Πιο αναλυτικά θα εξετάσουμε το TCP, UDP καθώς τις κατηγορίες των πρωτοκόλλων CoAP και MQTT. Προτού τα αναλύσουμε θα αναφέρουμε για λόγους πληρότητας τα βασικά στοιχεία του Internet Protocol (IP) στην επόμενη ενότητα.

Γ΄.1 Internet Protocol

Το IP αρχικά δεν είχε αναπτυχθεί από κανέναν διεθνή οργανισμό. Αναπτύχθηκε από τον Αμερικανικό στρατό για να επικοινωνούν μεταξύ τους τα διάφορα δίκτυα τους. Το IP στην αρχιτεκτονική OSI βρίσκεται στο επίπεδο του Network. Στο σχήμα Γ΄.1 παρουσιάζεται η ιεραρχική σειρά των πρωτοκόλλων ανάλογα με το OSI μοντέλο. Το IP προσφέρει μια αναξιόπιστη, χωρίς σύνδεση υπηρεσία αποστολής πακέτων Datagram.

Με το όρο αναξιόπιστη υπηρεσία ενώνουμε ότι δεν μας εγγυάται κανένας ότι το IP Datagram θα φτάσει στον τελικό του προορισμό. Δηλαδή θα κάνει ότι καλύτερο μπορεί (Best effort service). Για παράδειγμα αν πάει κάτι λάθος το IP έχει αν πολύ απλό μηχανισμό για την αντιμετώπιση των σφαλμάτων. Πετά το συγκεκριμένο datagram και προσπαθεί να στείλει στην πηγή ένα μήνυμα ICMP (Internet Control Message Protocol). Οποιαδήποτε αξιόπιστη υπηρεσία θα πρέπει να παρέχεται από τα υψηλότερα επίπεδα όπως το TCP.

Ο όρος χωρίς σύνδεση σημαίνει ότι το IP δεν κρατάει καμιά πληροφορία για τα επιτυχημένα datagrams τα οποία έχουν φτάσει στον προορισμό τους. Κάθε datagram

OSI layers	Internet Stack				
Application	HTTP	FTP	DNS	Rlogin	etc..
Transport	TCP / UDP				
Network	IP				
Link + Physical	Satellite Networks	Ethernet LAN	Wireless LAN	etc.	

Σχήμα Γ'.1: Internet Stack

είναι ανεξάρτητο από όλα τα υπόλοιπα datagram. Αυτό σημαίνει ότι τα datagram μπορεί να μην φτάσουν με την σειρά που ξεκίνησαν. Το οποίο μπορεί να οφείλεται ότι το κάθε ένα έχει πάρει διαφορετικές διαδρομές για να φτάσει στο τελικό προορισμό.

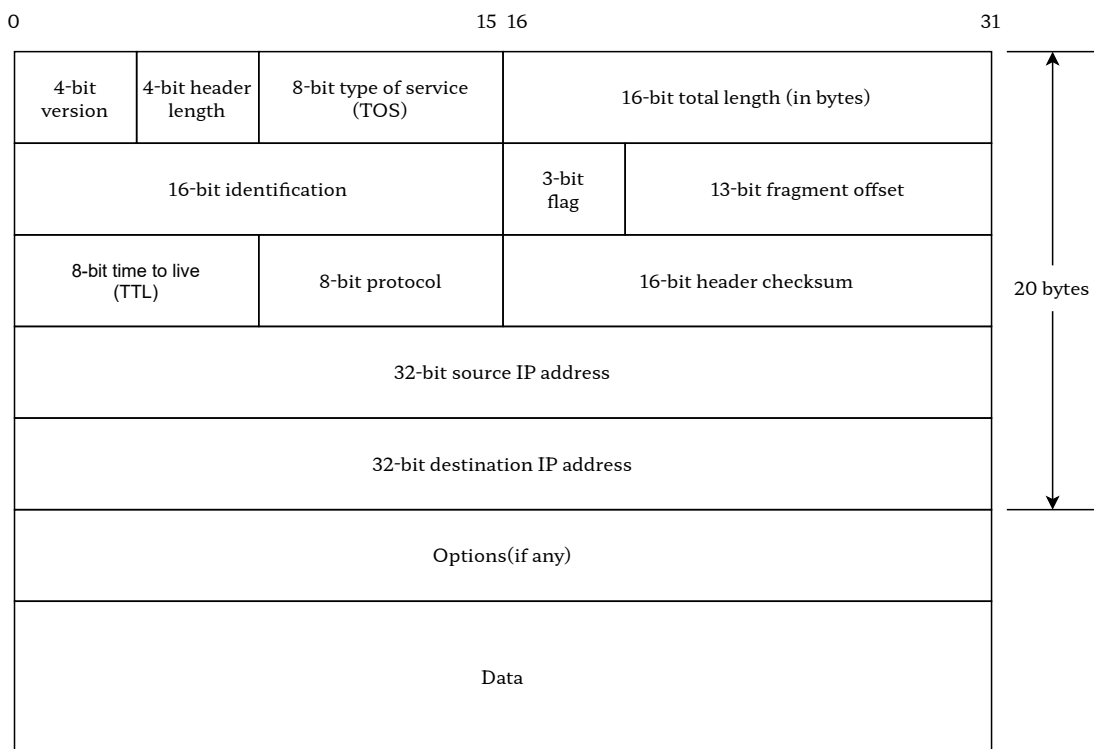
Το IP πρωτόκολλο έχει συγκεκριμένη δομή μηνύματος το οποίο χρησιμοποιούν οι υπολογιστές για να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Τα μηνύματα αυτά αποτελούνται εννοιολογικά από δυο κατηγορίες, την κεφαλίδα (Header) και τα δεδομένα (Data). Το Header προσφέρει μια δομή από επιλογές τις οποίες τις καθορίζει η εκάστοτε υπολογιστική μονάδα. Θα τις δούμε αναλυτικά παρακάτω. Το μικρότερο μέγεθος που μπορεί να έχει το Header είναι 20 byte εάν δεν υπάρχουν επιπλέον ρύθμισης. Αν υπάρχουν ρυθμίσεις το μέγιστο μέγεθος περιορίζεται στα 60 bytes.

Στο σχήμα Γ'.2 παρουσιάζεται η δομή που έχουν τα IP πακέτα. Το πιο σημαντικό bit είναι το 0 το οποίο βρίσκετε στα αριστερά και το λιγότερο σημαντικό είναι το 32 bit το οποίο βρίσκεται στην 31 θέση.

Το μέγιστο μέγεθος του IP datagram είναι 65.535 bytes το οποίο περιγράφεται από το πεδίο total length. Βεβαία όλα τα δίκτυα δεν έχουν την δυνατότητα να στέλνουν IP πακέτα με το μέγιστο μέγεθος. Σε αυτήν την περιποίηση ξεκινάει η διαδικασία του Fragmentation οπου το πακέτο χωρίζεται σε μικρότερα πακέτα ώστε να μεταδοθεί στον τελικό προορισμό. Για παραδείγματι το Ethernet ο μέγιστο μέγεθος πακέτου που υποστηρίζει Ethernet είναι 1.500 bytes.

Ένα σημαντικό πεδίο είναι το Time To Live (TTL) το οποίο θέτει ένα μέγιστο

αριθμό όπου το IP datagram θα περάσει από τους δρομολογητές routers. Στην ουσία αυτό το πεδίο θέτει την διάρκεια ζωής του IP datagram. Συνήθως το πεδίο αυτό αρχικοποιείτε με 32 ή 64 και μειώνεται κάθε φορά που περνάει από έναν router. Όταν το πεδίο αυτό φτάσει στην τιμή 0 το IP datagram απορρίπτετε από τον router και στέλνεται για προειδοποίηση προς την πηγή ένα ICMP μήνυμα. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται οι ατέρμονοι βρόχοι μέσα στο δίκτυο .



Σχήμα Γ'.2: IP Header

Τα πεδία Source και Destination IP address χρησιμοποιούνται για την δρομολόγηση των πακέτων στο δίκτυο μέσα από τους routers. Η διαδικασία για την παράδοση των πακέτων ονομάζεται routing. Οι routers για να παραδώσουν τα πακέτα στον τελικό προορισμό τους πραγματοποιούν τρεις ενέργειες.

Πρώτον ελέγχουν αν ο τελικός προορισμός ταιρίαζε με κάποια εγγραφή από τον πίνακα δρομολόγησης routing table που έχουν οι routers. Αν ταιριάζει πλήρως με κάποια εγγραφή τότε ο router θα στείλει το πακέτο στον επόμενο router ή κατευθείαν στον τελικό προορισμό.

Δεύτερων ελέγχουν αν η εγγραφή ταιρίαζε μόνο στο αναγνωριστικό ID του δικτύου

από το routing table. Αν βρεθεί τότε το πακέτο στέλνεται στον router του δικτύου.

Τρίτων ελέγχουν αν υπάρχει οποιαδήποτε εγγραφή από το routing table η οποία έχει το αναγνωριστικό "Default". Αν βρεθεί κάποια τότε στέλνεται το πακέτο σε αυτόν τον router.

Αν δεν από τα προηγούμενα βήματα δεν μπορεί να βρεθεί κάποιος router τότε το πακέτο δεν μπορεί να παραδοθεί. Σε αυτήν την περίπτωση ο υπολογιστική μονάδα που δημιούργησε το πακέτο είναι απρόσιτη (unreachable) και συνήθως η εφαρμογή που τρέχει από πάνω δημιουργεί κάποιο σφάλμα. Πρώτα γίνεται ο έλεγχος αν υπάρχει κάποια πλήρης αντιστοίχιση με τον τελικό προορισμό και μετά η αντιστοίχιση του ID του δικτύου. Μονό αν αποτύχουν οι δυο προηγούμενες αναζητήσεις χρησιμοποιείτε η επιλογή default αν υπάρχει.

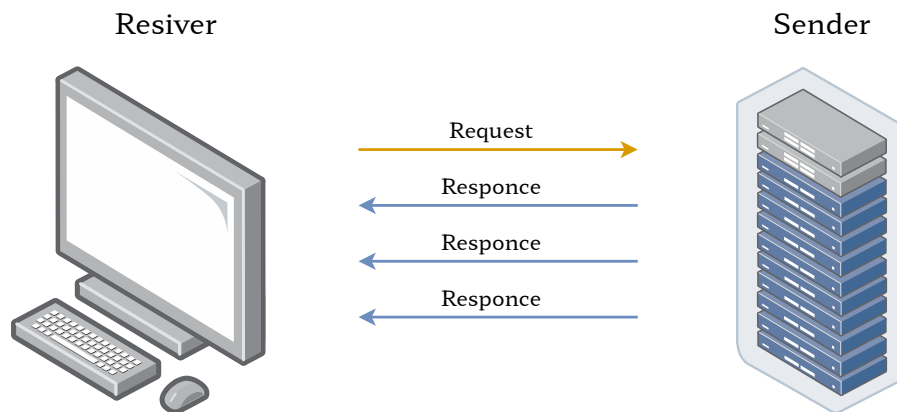
Γ'.2 User Datagram Protocol

Ένα από τα πιο συνηθισμένα πρωτοκολλά μεταφοράς είναι το User Datagram Protocol (UDP). Το UDP είναι ένα απλό πρωτόκολλο μεταφοράς το οποίο στηρίζεται στην λογική του ερωτήματος - απάντησης (request-respond).

Το στάνταρ του UDP παρουσιάζεται σε τρεις μόνο σελίδες μέσα από RFC 768 [45]. Το RFC είναι αχρώνύμιο του Request for Comments, είναι αριθμητικά μεμονωμένες δημοσιεύσεις σε σειρά οι οποίες περιγράφουν διάφορα στάνταρ. Ο οργανισμός ο οποίος είναι υπεύθυνος για την εκδόσή τον στάνταρ είναι Internet Engineering Task Force (IETF). Το IETF είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός όπου οι προγραμματιστές προωθούν ευελοντικά τα στάνταρ. Τα RFC περιγράφουν αφαιρετικά την διαδικασία εκτέλεσης του πρωτοκόλλου και όχι την διαδικασία της υλοποίηση και τις τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

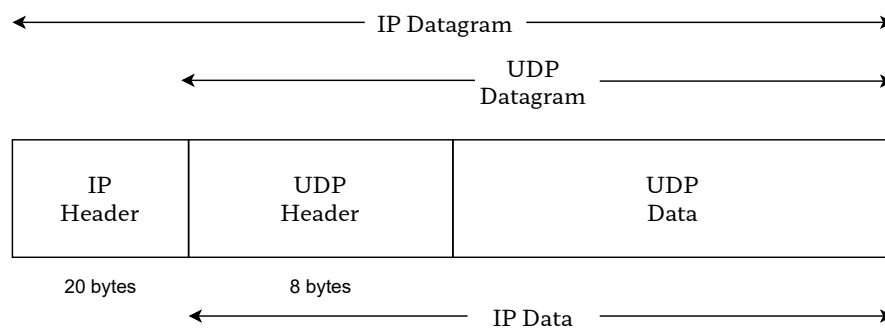
Το UDP είναι ένα best effort πρωτόκολλο το οποίο θα δεν κάνει τίποτα αν χαθεί το πακέτο μέσα στο δίκτυο. Αυτό βεβαία ακούγεται αρκετά αναξιόπιστο για την διακίνηση της πληροφορίας μέσα στο δίκτυο. Ωστόσο είναι αρκετά χρήσιμο σε εφαρμογές που είναι ευαίσθητες στον χρόνο. Δηλαδή δεν χρησιμοποιεί κάποιον πολύπλοκο μηχανισμό ο οποίος προσφέρει καθυστέρηση στην παράδοση των πακέτων. Με αυτόν τον τρόπο όμως θα έχουμε πακέτα τα οποία χάνονται και θα έρχονται εκτός σειράς. Το UDP χρησιμοποιείτε σε εφαρμογές ροής δεδομένων (Streaming media) για παράδειγμα παιχνίδια πολλών παικτών σε πραγματικό χρόνο [46, 47] και τηλεφωνία μέσω του IP (Voice Over IP) [48, 49, 50] καθώς και πολλές άλλες εφαρμογές [51]. Σε αυτές

τις εφαρμογές δεν μας πειράζει να χάσουμε πακέτα διότι αυτά τα πακέτα που χάσαμε ανήκουν στο παρελθόν και εμείς ενδιαφερόμαστε για το παρόν. Όπως θα δούμε και στο παρακάτω κεφαλαίο το TCP πρωτόκολλο δεν είναι κατάλληλο για αυτό του είδους τις εφαρμογές γιατί σε περίπτωση που χαθεί ένα πακέτο θα προσπαθήσει να το αναμεταδώσει προκαλώντας Jitter στην επικοινωνία των χρηστών.



Σχήμα Γ'.3: UDP model

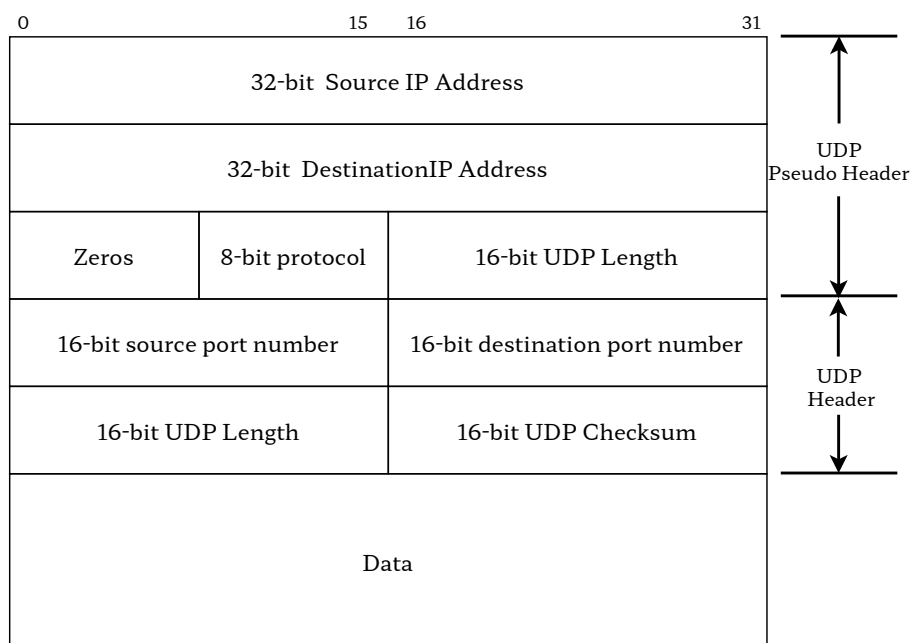
Το UDP πρωτόκολλο διαθέτει το δικό του πακέτο (UDP datagram) το οποίο μεταφέρει τα δεδομένα από την εφαρμογή. Το UDP datagram ενθυλακώνεται μέσα στο IP datagram και στέλνεται μέσα στο δίκτυο. Η εφαρμογή θα πρέπει να προσέχει το μέγεθος που θα έχουν τα IP datagrams για να αποφύγει το fragmentation.



Σχήμα Γ'.4: Ενθυλάκωση του UDP datagram μέσα στο IP datagram

Στο UDP header πρέπει να οριστούν ο αριθμός από τις πόρτες (port number) για την διαδικασία αποστολής και λήψης. Το πεδίο UDP Checksum υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το Pseudo header. Το Pseudo header αποτελείται από τα πεδία της πηγής

και του προορισμού των IP address, ένα πεδίο που αποτελείτε από μηδενικά, το πεδίο που περιέχει το αναγνωριστικό του πρωτοκόλλου που χρησιμοποιείτε και το πεδίο που περιέχει το συνολικό μέγεθος από το UDP header και UDP data. Το Pseudo header χρησιμοποιείτε μόνο για τον υπολογισμό του UDP Cheacksum και για να επιβεβαιώσει ότι τα δεδομένα έχουν φτάσει στον σωστό παραλήπτη. Σε αρκετές περιπτώσεις οι εφαρμογές γράφουν την δικιά τους υλοποίηση για το UDP για να εξυπηρετούν καλύτερα τις ανάγκες τους [52].



Σχήμα Γ'.5: Ενθυλάκωση του UDP datagram μέσα στο IP datagram

Έχει γίνει αρκετή ερευνά για το πως το UDP συμπεριφέρεται σε δικτυακά περιβάλλοντα τα οποία περιέχουν σε κάποιο μέρος τους δορυφορικές επικοινωνίες όπως [53, 54, 55, 56, 57, 58]. Αναφορικά οι ερευνητές στην ερευνά [59] την οποία διεξήγαγαν μελέτησαν μια παραλλαγή του UDP το UDP-Lite. Στα πειράματα τους χρησιμοποίησαν το VideoLAN για να δημιουργήσουν τα δεδομένα ροής και εξέτασαν πως επηρεάζεται από τα σφάλματα στα πακέτα κατά την μεταφορά του σε σχέση με το μέγεθος του πακέτου. Έδειξαν ότι το μέγεθος του UDP-Lite πακέτου μπορεί να επηρεάσει θετικά την ποιότητα του βίντεο σε σχέση με το UDP πάνω από δορυφορικά κανάλια. Παρόμοια έρευνα διεξήγαγαν οι ερευνητές στην εργασία τους [60] κατέληξαν ότι ένας buffer μερικών δευτερόλεπτων στην εφαρμογή μπορεί να βοηθήσει στην απορρόφηση

του jitter για δεδομένα που δεν είναι σε παροντικό χρόνο.

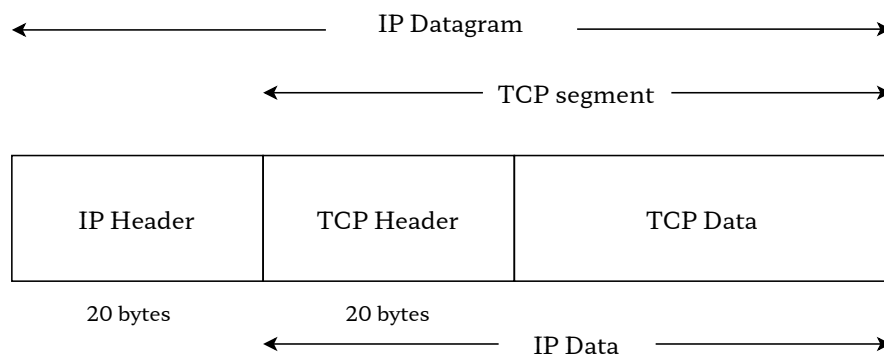
Γ'.3 Transmission Control Protocol

Σε αυτήν την ενότητα θα περιγράψουμε και θα αναλύσουμε τους μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται στο Transmission Control Protocol (TCP) . Το TCP είναι ένα αρκετά σύνθετο πρωτόκολλο μεταφοράς το οποίο παρόλο που χρησιμοποιεί το ίδιο επίπεδο δικτύου (IP) σαν το UDP προσφέρει όμως εντελώς διαφορετικές υπηρεσίες στην εφαρμογή που θα το χρησιμοποιήσει. Το TCP προσφέρει προσανατολισμένη σύνδεση, αξιοπιστία και υπηρεσίες ροής δεδομένων.

Με τον όρο προσανατολισμένη σύνδεση εννοούμε ότι δυο υπολογιστικές μονάδες που χρησιμοποιούν το TCP οπου συνήθως έχουν την μορφή ενός χρήστη και ενός εξυπηρετητή. Θα πρέπει πρώτα να εγκαθιδρύσουν μια TCP σύνδεση προτού ξεκινήσουν να ανταλλάζουν οποιαδήποτε δεδομένα. Η αξιοπιστία που προσφέρει το TCP την επιτυγχάνει κάνοντας τις παρακάτω ενέργειες:

- Τα δεδομένα από την εφαρμογή κατακερματίζονται ανάλογα με το τη θεωρεί το TCP ότι είναι το καλύτερο μέγεθος για να στείλει. Η κατακερματισμένη πληροφορία ονομάζεται chunks και έχει εντελώς διαφορετική λογική σε σχέση με το UDP όπου η κάθε εφαρμογή δημιουργεί μονή τις τα UDP datagrams.
- Το TCP όταν θα στείλει ένα πακέτο - segment θα κρατήσει ένα μετρητή χρόνου περιμένοντας από την άλλη άκρη την επιβεβαίωση ότι έχει φτάσει το πακέτο. Αν δεν επιβεβαιωθεί η παραλαβή του πακέτου σε αυτό χρονικό διάστημα το TCP θα επαναμετάδοση το πακέτο.
- Όταν το TCP δέχεται τα δεδομένα από την άλλη μεριά της σύνδεσης στέλνει κάποια επιβεβαίωση που ονομάζεται Acknowledgment. Το Acknowledgment δεν το στέλνεται άμεσα αλλά με μια πολύ μικρή καθυστέρηση.
- Το TCP διατηρεί στο heder το πεδίο του checksum. Ο σκοπός αυτού του πεδίου είναι να ανιχνεύσει πιθανές αλλοιώσεις που μπορεί να έγιναν κατά την μεταφορά των δεδομένων προς άλλη άκρη της σύνδεσης. Αν το πακέτο που έχει φτάσει έχει μη έγκυρο checksum τότε το TCP θα πρέπει να πετάξει το πακέτο και να μην στείλει Acknowledgment διότι δεν το έχει λάβει σωστά.

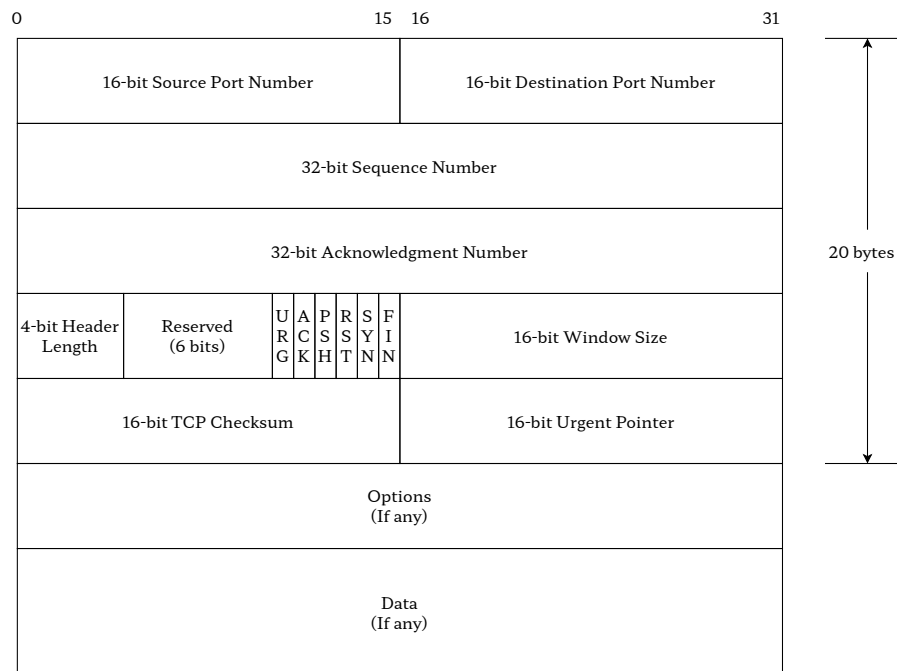
- Επειδή τα δεδομένα του TCP στέλνονται μέσω των IP Datagrams, τα IP Datagrams μπορούν να φτάσουν εκτός σειράς επόμενος και τα δεδομένα του TCP δεν θα φτάσουν με την σειρά που σταλτήκαν. Το TCP το ποιο δέχεται τα δεδομένα θα πρέπει να παραδώσει τα δεδομένα στην εφαρμογή με την σωστή σειρά.
- Λόγω των IP datagrams που μπορούν να δημιουργηθούν διπλότυπα. Το TCP θα πρέπει να πετάξει οποιαδήποτε διπλότυπα δεδομένα του παρουσιαστούν.
- Το TCP προσφέρει ελέγχο στην ροή των δεδομένων (flow control). Κάθε πλευρά της σύνδεσης έχει έναν περιορισμένο χώρο στον buffer που φτάνουν τα δεδομένα. Το TCP του αποστολέα επιτρέπει να στείλει όσα δεδομένα μπορεί να χωρέσει ο buffer του παραλήπτη. Αυτό αποτρέπει έναν γρήγορο αποστολέα να προκαλέσει συμφόρηση με μηνύματα έναν αργό παραλήπτη.



Σχήμα Γ'.6: Ενθυλάκωση του TCP segment μέσα στο IP datagram

Η λογική της ενθυλάκωσης του TCP segment μέσα στο IP datagram είναι ίδια με του UDP. Ωστόσο το TCP header είναι μεγαλύτερο από το UDP header διότι προσφέρει περισσότερες υπηρεσίες. Ο συνδυασμός της IP διεύθυνσης με τον αριθμό του port ονομάζεται socket. Η κάθε TCP σύνδεση μέσα στο διαδίκτυο μπορεί να αναγνωριστεί μοναδικά μέσα από μια πλειάδα που περιεχί την IP διεύθυνση, τον αριθμό port του χρήστη και τις αντίστοιχες πληροφορίες για τον εξυπηρετητή. Αυτή η πλειάδα ονομάζεται socket pair. Στο σχήμα Γ'.7 παρουσιάζονται το TCP header.

Το πεδίο Sequence number χρησιμοποιείτε ως αναγνωριστικό από το TCP για τα δεδομένα που στέλνει ο αποστολέας προς τον παραλήπτη. Το Sequence number είναι ένας 32 bit αριθμός ο οποίος όταν ξεπεράσει το μέγιστο όριο $2^{32} - 1$ ξανά ξεκινάει η μετρήσει από το 0.



Σχήμα Γ'.7: TCP header

Το πεδίο Acknowledgment number ACK χρησιμοποιείτε για την επιβεβαίωση των δεδομένων που έχουν φτάσει στον παραλήπτη. Κάθε φορά που γίνεται μια επιτυχημένη μετάδοση στον παραλήπτη από τον αποστολέα. Ο παραλήπτης θα επιστρέψει στον αποστολέα ως ACK το *Sequencenumber* + 1. Αυτό το πεδίο είναι διαθέσιμο όταν χρησιμοποιείτε το Flag ACK στο header.

Στο TCP header υπάρχουν έξι διαφορετικά *bits* για Flags. Τα οποία μπορεί να είναι ενεργά περισσότερα από ένα κάθε φορά. Το URG χρησιμοποιείτε όταν είναι ενεργούμενη η επιλογή urgent pointer. Αντίστοιχα το ACK χρησιμοποιείτε από το TCP για να δει αν χρειάζεται να συμπεριλάβει το Acknowledgment number. Το PSH υποδουλώνει στο TCP του παραλήπτη ότι τα δεδομένα που έχει λάβει πρέπει να παραδοθούν στην εφαρμογή το συντομότερο δυνατό. Με το RST η σύνδεση μεταξύ δυο υπολογιστικών μονάδων πρέπει να ξαναγίνει η εδραίωση της. Το SYN χρησιμοποιείτε για να συγχρονίσουν το sequense number πριν ξεκινήσει η σύνδεση. Τέλος το FIN το οποίο δείχνει στο TCP ότι δεν υπάρχουν άλλα δεδομένα να στείλει και ξεκινάει η διαδικασία τερματισμού της σύνδεσης.

Το TCP είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να προσθέρει αμφίδρομη επικοινωνία (full-duplex) στο επίπεδο της εφαρμογής. Αυτό σημαίνει ότι τα μπορούν να ρέουν τα δεδο-

μένα και από τις δυο κατευθύνσεις ανεξάρτητα μεταξύ τους. Για αυτό τον λόγο κάθε πλευράς της συνδέσεως κρατάει ανεξάρτητα το sequence number από τα δεδομένα τα οποία μεταδίδονται.

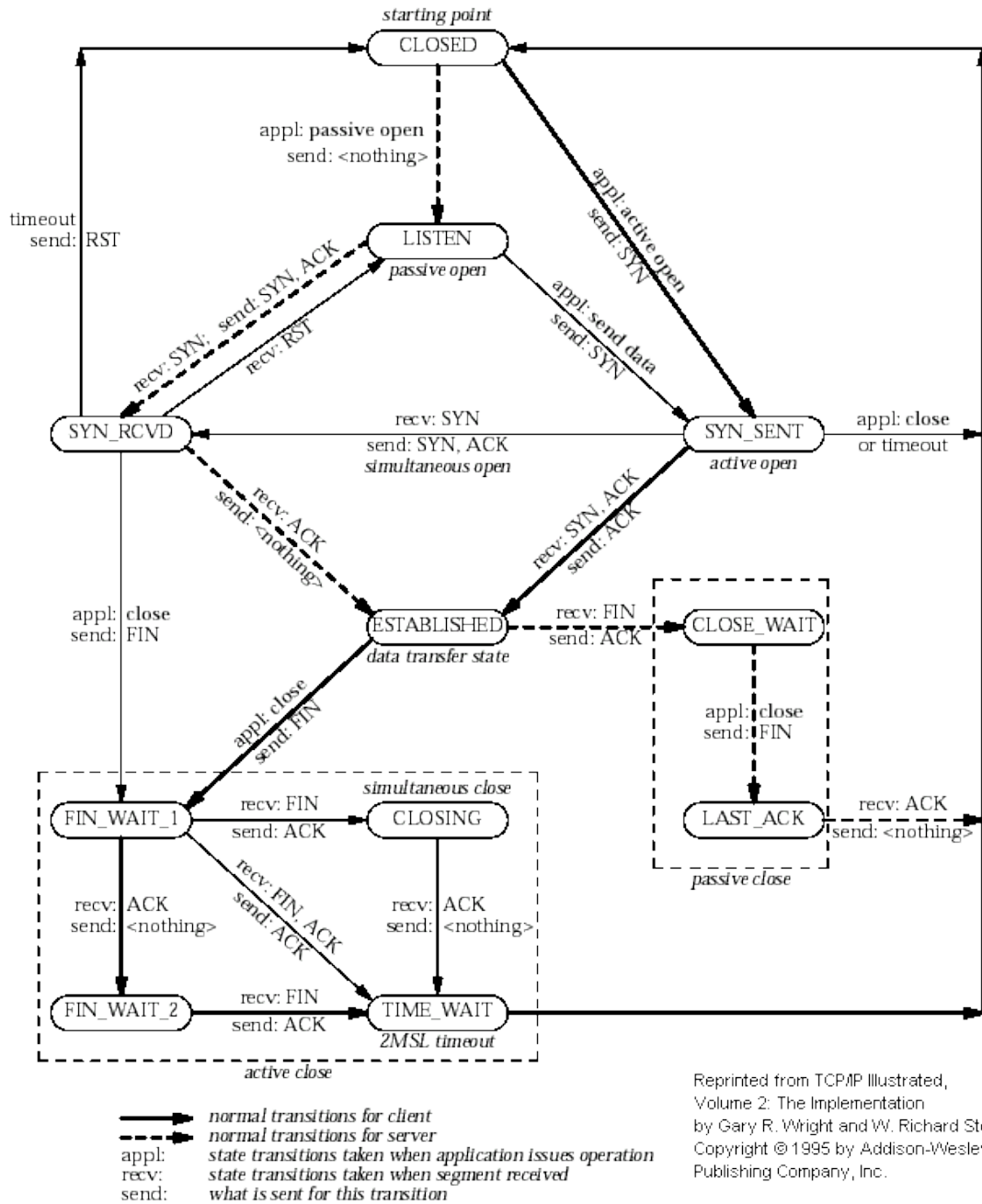
Ο έλεγχος ροής που προσφέρει το TCP διαμορφώνεται από το διαφημιζόμενο μέγεθος του παραθύρου (advertising window size) και από τις δυο πλευρές της σύνδεσης. Το μέγεθος του μετρείται σε bytes, λόγω των 16 bits το παράθυρο περιορίζεται στα 65535 bytes. Ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα να επεκταθεί από τα 16bits στα 32bits με τη μέγιστη τιμή 65535×2^{16} bytes.

Το πεδίο checksum έχει την ίδια λειτουργία με το UDP checksum και δημιουργείται παρόμοια. Μια από τις πιο συχνές ρύθμισης για το πεδίο option είναι το μέγιστο μέγεθος του segment (Max Segment Size) όπου ονομάζεται MSS. Τα δυο μέρη της σύνδεσης ορίζουν αυτή την επιλογή συνήθως από το πρώτο πακέτο που ανταλλάζουν τα δυο μέρη. Με αυτόν τον τρόπο ορίζεται το μέγεθος του πακέτου που θέλει να στείλει ο αποστολέας στον παραλήπτη.

Όπως θα δούμε και στις παρακάτω ενότητες υπάρχουν αρκετές παραλλαγές του TCP που έχουν υλοποιηθεί. Όλες αυτές οι διαφορετικές παραλλαγές έχουν υλοποιηθεί για να λειτουργούν πιο αποδοτικά σε διαφορετικά δίκτυα περιβαλλοντικά. Ωστόσο όλες οι παραλλαγές έχουν κάποια στάνταρτ μηχανισμούς που χρησιμοποιούν για να λειτουργήσουν όπως η έναρξη και ο τερματισμός σύνδεσης, η επαναμετάδοση χαμένων πακέτων και ο έλεγχος ροής της πληροφορίας. Αναφορικά όλες οι παραλλαγές του TCP χρησιμοποιούν τους μηχανισμούς τους με βάση το διάγραμμα καταστάσεων από το σχήμα Γ'.8.

Το TCP πριν μετάδοση οποιαδήποτε πληροφορία πρέπει πρώτα να εδραιώσει την σύνδεση μεταξύ των δυο υπολογιστικών μονάδων. Για να εδραιωθεί μια σύνδεση απαιτούνται τρία βήματα:

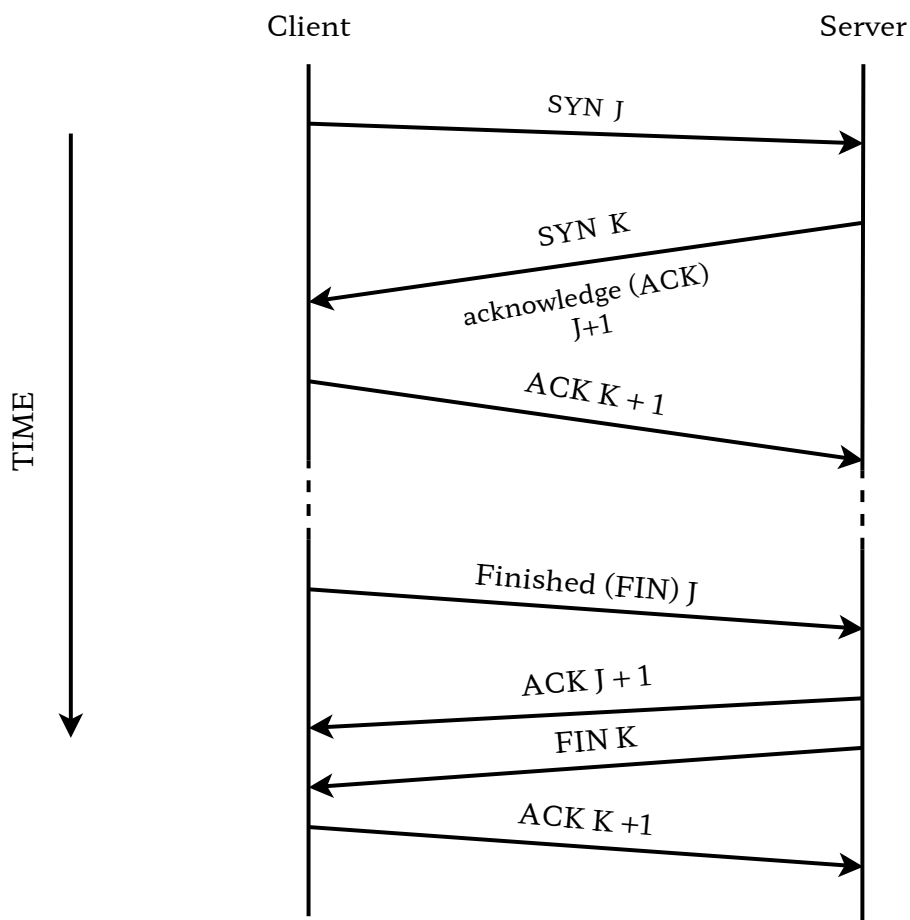
1. Ο αποστολέας θα στείλει ένα πακέτο τύπου SYN. Το πακέτο που δημιουργείτε προσδιορίζει το port number και την IP διεύθυνση του εξυπηρετητή που θέλει να συνδεθεί καθώς και το αρχικό sequence number του αποστολέα.
2. Ο εξυπηρετητής θα απαντήσει με το δικό του SYN πακέτο όπου θα περιχέει το αρχικό sequence number του εξυπηρετητή. Ο εξυπηρετητής θα επιβεβαιώσει το πακέτο του αποστολέα, στέλνοντας ACK πακέτο με το αρχικό sequence number συν ένα του αποστολέα.



Σχήμα Γ'.8: Διάγραμμα καταστάσεων του TCP

3. Ο αποστολέας πρέπει να επιβεβαιώσει το SYN από τον εξυπηρετητή στέλνοντας πίσω το αρχικό sequence number συν ένα του εξυπηρετητή.

Με αυτά τα τρία βήματα η σύνδεση μπορεί να εδραιωθεί και αυτή η διαδικασία ονομάζεται three-way handshake. Παρόλο που χρειάζεται τρία βήματα για να εδραιωθεί μια σύνδεση χρειάζονται τέσσερα βήματα για να τερματιστεί. Επειδή η TCP σύνδεση είναι full duplex και τα δεδομένα ρέουν ανεξάρτητα και από τις δυο πλευρές, κάθε πλευρά της σύνδεσης πρέπει να κλείσει ανεξάρτητα από την άλλη.



Σχήμα Γ'.9: Σχηματική αναπαράσταση της εδραίωσης και του τερματισμού της TCP σύνδεσης

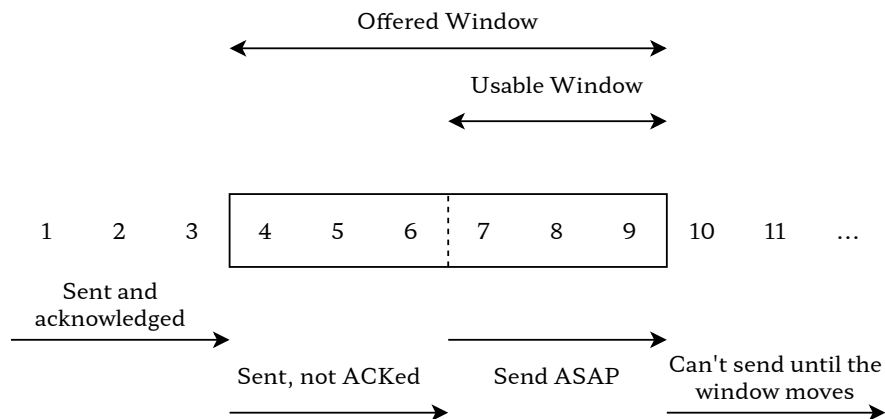
1. Ο τερματισμός της σύνδεσης ξεκινάει όταν σταλθεί το πρώτο πακέτο τύπου FIN από τον αποστολέα.

2. Ο εξυπηρετητής θα επιβεβαιώσει το με ACK το FIN πακέτο του αποστολέα επιστρέφοντας το sequence number συν ένα.
3. Ο εξυπηρετητής για να τερμάτισε το δικό του μέρος της σύνδεσης. Θα στείλει το δικό του FIN πακέτο στον αποστολέα.
4. Ο αποστολέας για να τερματίσει την σύνδεση θα επιβεβαιώσει το με ACK το FIN πακέτο του εξυπηρετητής επιστρέφοντας το sequence number συν ένα.

Στο σχήμα Γ'.9 παρουσιάζονται τα βήματα με τα οποία ανοίγει - εδραιώνεται και τερματίζεται η σύνδεση. Όταν η σύνδεση εδραιωθεί από τις δυο υπολογιστικές μονάδες το TCP ξεκινάει την μεταφορά των δεδομένων. Κατά την μεταφορά των δεδομένων το TCP δεν στέλνει άμεσο ACK για τα δεδομένα που έχει παραλάβει άλλα καθυστερεί ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα έτσι ώστε να στείλει τα δεδομένα μαζί με το ACK. Η διαδικασία αυτή εκτελείτε από τον αλγόριθμο του Nagle.

Ένας άλλος σημαντικός μηχανισμός που χρησιμοποιεί το TCP είναι το Sliding Window . Αυτός ο μηχανισμός χρησιμοποιείται για να υπολογίσει πόσα δεδομένα μπορεί να στείλει ο αποστολέας στον παραλήπτη έτσι ώστε να μειώσει τις απώλειες. Το παράθυρο το οποίο διαφημίζεται από τον παραλήπτη ονομάζεται Offered Window. Στο παράδειγμα του σχήματος Γ'.10 καλύπτει από 4 έως 9 byte με μέγεθος παραθύρου να είναι 6. Όλα τα bytes που είναι μικρότερα του 4 έχουν γίνει ACK. Ο αποστολέας υπολογίζει Usable Window με το οποίο γνωρίζει πόσο δεδομένα πρέπει να μεταδώσει την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Το Sliding Window με την πάροδο του χρόνου μετακινείται προς τα δεξιά καθώς ο αποστολέας κάνει ACK τα δεδομένα που δέχεται. Ανάλογα με την κίνηση των δυο ορίων του παραθύρου το μέγεθος του μειώνεται ή αυξάνεται. Με τρεις όρους μπορούμε να περιγράψουμε την κίνηση του παραθύρου.

1. Το παράθυρο λέμε ότι κλείνει (closes) καθώς το αριστερό άκρο προχωράει προ τα δεξιά. Αυτό συμβαίνει όταν τα δεδομένα έχουν μεταδοθεί και γίνει ACK
2. Το παράθυρο λέμε ότι ανοίγει (opens) όταν το δεξί άκρο μετακινείται προς τα δεξιά, με αποτέλεσμα να επιτρέπει να αποσταλούν περισσότερα δεδομένα. Αυτό γίνεται όταν κατά την διαδικασία λήψης των δεδομένων στην άλλη πλευρά διαδίδονται ACK δεδομένα, απελευθερώνοντας έτσι χώρο στον Buffer του TCP για την λήψη των νέων δεδομένων.



Σχήμα Γ'.10: Σχηματική αναπαράσταση του Sliding Window

3. Το παράθυρο λέμε ότι μικραίνει (shrinks) όταν το δεξί άκρο μετακινείτε προς τα αριστερά.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το Sliding Window δεν μπορεί μετακινηθεί πιο αριστερά από το μεγαλύτερο Byte το οποίο έχει γίνει ACK.

Slow Start

Κατά την μεταφορά των δεδομένων μέσα στο δίκτυο υπάρχουν δρομολογητές και σύνδεσης με αργίες ταχύτητες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι δρομολογητές να τοποθετούν τα πακέτα που τους έρχονται σε ουρές. Κάποια στιγμή οι δρομολογητές θα ξεμείνουν από μνήμη και τα πακέτα τα οποία έρχονται θα πετιούνται λόγω ελλείψεως χώρου. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η ιδιομορφία στα δίκτυα ο Jacobson το 1988 [5] πρότεινε έναν απλό μηχανισμό που αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα. Ο αλγόριθμος αυτός ονομάζεται Slow Start και λειτουργεί ελέγχοντας την ροή των νέων δεδομένων που θα εισέλθουν στο δίκτυο παρατηρώντας τον ρυθμό με τον οποίο τα πακέτα γίνονται ACK.

Το Slow Start προσθετή άλλο ένα παράθυρο στο TCP του αποστολέα που ονομάζεται παράθυρο συμφόρησης (congestion window) όπου στην βιβλιογραφία το συνάτταμε ως cwnd. Όταν η σύνδεση έχει εδραιωθεί μεταξύ δυο υπολογιστικών μονάδων το cwnd αρχικοποιείται με το μέγεθος του ενός segment. Κάθε φορά που ο αποστολέας δέχεται ένα ACK τότε το μέγεθος του cwnd αυξάνεται κατά ένα segment. Ο αποστολέας κάθε φορά μπορεί να στείλει την ελάχιστη ποσότητα δεδομένων ανάμεσα στο cwnd και διαφημιζόμενο παράθυρο του παραλήπτη. Το cwnd είναι ο μηχανισμός για τον έλεγχο

της ροής των δεδομένων από την πλευρά αποστολέα ενώ το διαφημιζόμενο παράθυρο είναι ο μηχανισμός για τον έλεγχο ροής των δεδομένων που εφαρμόζεται από τον παραλήπτη.

Με το Slow Start ο αποστολέας ξεκινάει και θα μεταδώσει ένα segment περιμένοντας να λάβει το ACK από τον παραλήπτη. Όταν παρουσιαστή το ACK το cwnd από ένα segment θα γίνει δυο και ο αποστολέας θα μεταδώσει δυο segments. Όταν αυτά γίνουν ACK το cwnd θα γίνει τέσσερα και ούτω κάθε έξης. Αυτή η πολιτική ονομάζεται Additive Increase. Όπως βλέπουμε αυτός ο μηχανισμός αυξάνει εκθετικά το cwnd. Με την παραδώ του χρόνου κάποια χρονική στιγμή το cwnd θα γίνει αρκετά μεγάλο και θα έχει κάλυψη την χωρητικότητα που διαθέτει το δίκτυο με αποτέλεσμα οι δρομολογητές να πετάνε εισερχόμενα πακέτα. Αυτό μας δίνει την ένδειξη ότι το cwnd έχει γίνει αρκετά μεγάλο και προκαλεί συμφόρηση στο δίκτυο.

Timeout και Retransmission

Όπως έχουμε αναφέρει το TCP προσφέρει αξιόπιστες υπηρεσίες στο επίπεδο της εφαρμογής για την μεταφορά των δεδομένων. Ένας από τους τρόπους για να προσφέρει αξιοπιστία είναι η αποστολή και η επιβεβαίωση των segment που έχουν σταλεί. Πολλές φορές όμως τα segment και τα ACK μπορούν να χαθούν κατά την μεταφορά του. Το TCP για να αντιμετωπίσει αυτό το πρόβλημα θέτει έναν αντίστροφο μετρητή χρόνου timeout κάθε φορά που στέλνει δεδομένα. Αν ο χρόνος λήξει και δεν έχει λάβει το ACK από τα δεδομένα το TCP θα επαναμεταδώσει τα δεδομένα retransmission. Ένα αρκετό σημαντικό κομμάτι σε κάθε υλοποίηση του TCP είναι το πως θα υλοποιηθούν οι επαναμεταδόσεις και το timeout.

Το TCP υπολογίζει το timeout και το retransmission με βάση το χρόνο που χρειάζεται να πάει και επιστέψει η πληροφορία από την μια άκρη της σύνδεσης στην άλλη, αυτή η μέτρηση ονομάζεται round-trip time (RTT). Κατά την παραδώ του χρόνου περιμένουμε το RTT να αλλάξει λόγω της διαφορετικής κίνησης που δημιουργείται μέσα στο δίκτυο. Το TCP πρέπει να αναγνωρίζει αυτές τις αλλαγές μέσα στο δίκτυο και να προσαρμόζει κατάλληλα το timeout και τα retransmissions.

Στης αρχικές οδηγίες του TCP χρησιμοποιεί έναν εξομαλυντή που εκτιμά το RTT (smoothed RTT estimator) ο οποίος συμβολίζεται με R . Ανανεώνεται αν ταχτά χρονικά διαστήματα και χρησιμοποιεί ένα low pass filter για την μέτρηση του RTT. Το RTT θα το συμβολίζουμε με το M .

$$R \leftarrow aR + (1 - a)M \quad (\Gamma'.1)$$

Με τον τύπο Γ'.1 ανανεώνετε ο R . Η μεταβλητή a είναι ένας συντελεστής εξομάλυνσης με προτιμώμενη τιμή το 0,9. Κάθε φορά που γίνεται η μέτρηση για το RTT το R ανανεώνετε. Με βάση το R θέτεται ο αντίστροφος μετρητής χρόνου (RTO) για την αναμετάδοση των πακέτων ως :

$$RTO = R\beta \quad (\Gamma'.2)$$

Όπου το β είναι ένας συντελεστής διακύμανσης καθυστέρησης με προτεινόμενη τιμή 2 [61].

Ο μηχανήματος ο οποίος περιγράψαμε για τον υπολογισμό των επαναμεταδόσεων είναι πολύ απλός, διαφορετικές υλοποιήσεις του TCP χρησιμοποιούν διαφορετικούς τρόπους για τον υπολογισμό των timeout και των retransmissions.

Bandwith Delay Product

Το Bandwith Delay Product (BDP) μας δείχνει πόσα δεδομένα μπορούμε να στείλουμε μέσα από το κανάλι και η τιμή του ποικίλη ευρέος ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της σύνδεσης. Όταν το BDP γίνει αρκετά μεγάλο επηρεάζει την απόδοση του TCP. Τα δίκτυα τα οποία έχουν κανάλια με μεγάλο BDP ονομάζονται Long Fat Networks. Το BDP μετριέται σε bits και υπολογίζεται από τον ρυθμό μετάδοσης της σύνδεσης (bandwith) που μετριέται σε *bits/s* και από το RTT της σύνδεσης που την μετράμε σε *sec*.

$$BDP = Bandwidth \times RTT \quad (\Gamma'.3)$$

Για παράδειγμα ένα δορυφορικό κανάλι έχει $5Gb/s$ και $RTT\ 500ms$ δίνει ως BDP $298.02Mb$. Όσο το BDP αυξάνετε τόσο η απόδοση του TCP μειώνεται. Η πολιτική Additive Increase που χρησιμοποιεί το TCP δεν έχει την δυνατότητα κερδίσει το επιπρόσθετο bandwith για ένα πακέτο ανά RTT. Όταν το BDP είναι αρκετό μεγάλο το κανάλι της σύνδεσης έχει χωρητικότητα για χιλιάδες πακέτα, το TCP μπορεί να σπαταλήσει χιλιάδες RTT μέχρι να χρησιμοποιήσει πλήρως το bandwith του καναλιού. Επιπλέον η αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού δεν βελτιώνει την μεταφορά από μικρές ροές δεδομένο. Σε αυτή την περίπτωση το TCP δεν μπορεί να διαθέσει το bandwith γρηγορότερα από το Slow Start.

Congestion Avoidance

Όπως είδαμε από τις προηγούμενη ενότητα κάποια χρονική στιγμή θα φτάσουμε το όριο των πακέτων που μπορούν να διαχειριστούν οι δρομολογητές. Ξεπερνώντας αυτό το όριο οι δρομολογητές θα αρχίσουν να πετάνε τα πακέτα τα οποίο τους έρχονται. Αυτό σημαίνει ότι στο δίκτυο υπάρχει συμφόρηση. Η αντιμετώπιση της συμφόρησης γίνεται με τον μηχανισμό Congestion avoidance που περιγράφεται στην εργασία [5].

Ο μηχανισμός αυτός εικάζει ότι υπάρχει πολύ μικρή πιθανότητα να χαθεί το segment λόγω ζημιάς κατά την μετάδοση του. Για αυτό όταν χάνεται το πακέτο μέσα στο δίκτυο ανάμεσα στις δυο πλευρές υποδεικνύεται ότι υπάρχει κάπου συμφόρηση. Υπάρχουν δυο ενδείξεις ότι κάποιο πακέτο έχει χαθεί: έχει συμβεί timeout σε κάποιο segment και η παραλαβή διπλοτύπου ACK.

Το Congestion Avoidance και το Slow Start είναι ανεξάρτητη μηχανισμοί που προσπαθούν να πετύχουν διαφορετικούς στόχους. Όταν πραγματοποιηθεί η συμφόρηση θέλουμε να μειώνουμε τον ρυθμό με τον οποίο μεταδίδουμε τα πακέτα μέσα στο δίκτυο. Μόλις ξεπεράσουμε την συμφόρηση θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε ξανά το Slow Start για να συνεχίσουμε κανονικά. Παρόλο που φαίνονται διαφορετικοί αλγόριθμοι υλοποιούνται μαζί στην πράξη. Οι μηχανισμοί Congestion Avoidance και Slow Start χρειάζονται δυο μεταβλητές οι οποίες πρέπει να διατηρούνται σε κάθε σύνδεση. Το παράθυρο συμφόρησης (Congestion window), cwnd και το όριο του μεγέθους του Slow Start, ssthresh. Ο συνδυασμός αυτόν των μηχανισμών λειτουργεί ως ακολούθως:

1. Κατά την αρχικοποίηση της σύνδεσης θέτεται το cwnd στο μέγεθος του ενός segment και το ssthresh στα 65535 bytes.
2. Το TCP δεν θα στείλει πότε περισσότερα δεδομένα από το ελάχιστο ανάμεσα στο cwnd και του παραλήπτη το διαφημιζόμενο παράθυρο. Το Congestion avoidance είναι μηχανισμός ελέγχου ροής που επιβάλλεται από τον αποστολέα, ενώ το διαφημιζόμενο παράθυρο είναι μηχανισμός έλεγχου ροής που επιβάλλεται από τον παραλήπτη.
3. Όταν πραγματοποιείτε συμφόρηση και ενδείκνυται από την παραλαβή διπλοτύπου ACK. Τότε το ssthresh θέτεται στο μισό του παρόν cwnd και αν η συμφόρηση υποδεικνύετε ότι έχει προκληθεί από timeout το cwnd θέτεται στο ένα segment.
4. Όταν τα νέα δεδομένα γίνουν ACK από την άλλη πλευρά αυξάνεται το cwnd. Η

αύξηση του $cwnd$ εξαρτάτε από αν το TCP πραγματοποιεί Slow Start ή congestion avoidance.

Αν το $cwnd$ είναι μικρότερο από το $ssthresh$ το TCP χρησιμοποιεί το slow start αν ισχύει το αντίθετο χρησιμοποιεί το congestion avoidance. Το Slow Start θα συνεχίσει μέχρι το μισώ $cwnd$ οπότε έχει γίνει τελευταία συμφόρηση και μετά θα αναλάβει το congestion avoidance.

Το slow start αρχικοποιείτε με ένα segment και αυξάνεται κατά ένα κάθε φορά που ο αποστολέας δέχεται κάποιο ACK. Όπως είπαμε και νωρίτερα το $cwnd$ αυξάνεται εκθετικά στο slow start. Το Congestion avoidance θα αναγκάσει το $cwnd$ να αυξηθεί κατά $1/cwnd$ κάθε φορά που λαμβάνει κάποιο ACK. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται προσθετική αύξηση (additive increase).

Μπορούμε να εκφράσουμε το W ως το congestion window με το MSS ως μονάδες μέτρησης, όπως αναφέραμε παραπάνω το $cwnd$ ανανεώνεται με τους παρακάτω κανόνες.

$$W_{i+1} = \begin{cases} W_i + 1, & \text{Slow Start} \\ W_i + \frac{1}{W_i}, & \text{Congestion Avoidance} \end{cases} \quad (\Gamma'.4)$$

Με τον δείκτη i συμβολίζουμε την παραλαβή του i th ACK από το TCP του αποστολέα.

Fast Retransmit και Fast Recovery

Στην προηγούμενη ενότητα είδαμε πως οι μηχανισμοί Slow Start και Congestion Avoidance λειτουργούν μαζί. Όταν κάποιο segment έρχεται εκτός σειράς το TCP θα δημιουργήσει διπλότυπα ACK τα οποία δεν οφείλονται στην συμφόρηση. Για αυτό τον λόγο δεν είναι δυνατόν να γνωρίζει αν το διπλότυπο ACK προκλήθηκε από το χάσιμο του segment ή από κάποιο segment το οποίο ήρθε εκτός σειράς για αυτό λόγο περιμένουμε ένα μικρό αριθμό από διπλότυπα ACKs.

Αν εμφανιστούν τρία ή παραπάνω διπλότυπα ACKs στη σειρά είναι μια ισχυρή ένδειξη ότι το segment έχει χαθεί. Σε αυτήν την περίπτωση θα πραγματοποιήσουμε το retransmission του χαμένου segment χωρίς να περιμένουμε να λήξει ο χρόνος για την επαναμετάδοση του αυτός ο μηχανισμός ονομάζεται Fast Retransmit . Μετά το retransmission εφαρμόζουμε Congestion Avoidance και όχι Slow Start οπότε αυτός ο μηχανισμός ονομάζεται Fast Recovery . Ο λόγος για τον οποίο δεν εφαρμόζουμε

Slow Start κατά την παραλαβή του διπλότυπου ACK είναι ότι περιμένουμε να μάθουμε πολλά περισσότερα από το ότι ένα segment έχει χαθεί. Επειδή ρέουν δεδομένα ανάμεσα στις δυο πλευρές και δεν θέλουμε να μειώσουμε απότομα την ροή των δεδομένων εφαρμόζοντας Slow Start. Παρακάτω τα βήματα με τα οποία οι αλγόριθμοι υλοποιούνται μαζί.

1. Όταν ληφθεί το τρίτο διπλότυπο ACK, τότε θέτουμε το ssthresh στο μισό από το ελάχιστο μεταξύ του παρόντος cwnd και το διαφημιζόμενο παράθυρο του παραλήπτη. Το TCP θα επαναμετάδοση το χαμένο segment και θέτει το cwnd ίσο με το ssthresh προσθέτοντας τρις φορές το μέγεθος του segment.
2. Κάθε φορά που έρχεται ένα άλλο διπλότυπο ACK το cwnd αυξάνεται κατά μια φορά από το μέγεθος του segment και μεταδίδει το segment
3. Όταν το επόμενο ACK φτάσει και επιβεβαιώσει τα καινούρια δεδομένα το TCP θέτει το cwnd στο ssthresh. Αυτό θα πρέπει να είναι το ACK για το retransmission από το πρώτο βήμα, ένα RTT μετά την επαναμετάδοση. Αυτό το ACK θα πρέπει αν επιβεβαιώσει όλα τα ενδιαμέσως segment μεταξύ του χαμένου segment και του τρίτου διπλότυπου ACK. Αυτό το βήμα εφαρμόζει Congestion Avoidance επειδή μειώνει στο μισό τον ρυθμό όταν ένα πακέτο χάνετε.

Το TCP που είναι υλοποιημένοι οι μηχανισμοί - αλγόριθμοι Slow-Start, Congestion Avoidance και το Fast Retransmit στην βιβλιογραφία αναφέρετε ως TCP Tahoe. Ενώ το TCP Reno υλοποιεί τους προηγούμενους αλγορίθμους συν το Fast Recovery [62].

Γ'.3.1 TCP New Reno

Το TCP New Reno είναι ένα ελαφρός τροποποιούμενο TCP Reno. Το TCP New Reno χρησιμοποιήσει όλους τους μηχανισμούς από το TCP Reno με μια διάφορα στην υλοποίηση του αλγορίθμου Fast Recovery. Το TCP New Reno όπως θα δούμε είναι πιο ικανό από το TCP Reno όταν έχουμε πολλαπλές απώλειες από πακέτα στο ίδιο παράθυρο. Το TCP Reno και TCP New Reno θα εισέλθουν στο Fast Retransmit όταν λάβουν πολλαπλά διπλότυπα πακέτα, άλλα το TCP New Reno δεν θα φύγει από την κατάσταση Fast Recovery μέχρι τα λάβει την επιβίωση όλων των πακέτων που σταλήθηκαν σε αυτήν την κατάσταση. Όταν γίνονται πολλαπλές απώλειες από τα πακέτα μέσα στο ίδιο παράθυρο το TCP New Reno θα κάνει retransmit χωρίς να λήξει

ο χρόνος από το timeout. Ο ρυθμός επαναμετάδοσης είναι ένα πακέτο που έχει χαθεί ανά RTT μέχρις ότου όλα τα πακέτα που χάθηκαν από το παράθυρο να μεταδοθούν. Από την κατάσταση του Fast Recovery θα εξέλθει όταν όλα τα πακέτα από το παράθυρο έχουν επιβεβαιωθεί. Το TCP New Reno περιγράφεται από το RFC 6582 [63].

Ένα σημαντικό πρόβλημα που έχει το TCP New Reno είναι ότι χρειάζεται ένα RTT για να ανιχνεύσει το κάθε πακέτο το οποίο έχει χαθεί. Όταν το ACK από την πρώτη επαναμετάδοση ληφθεί τότε μόνο μπορούμε να αποφασίσουμε αν το πακέτο έχει χαθεί και να αρχίσουν οι μηχανισμοί Fast Retransmit και Fast Recovery [64, 65].

Το TCP Neo Reno είναι ένα από τα πιο διαδιδόμενα πρωτοκόλλα μεταφοράς που χρησιμοποιείτε στο διαδίκτυο. Πολλές έρευνες έχουν γίνει για την ανάλυση της συμπεριφορά του σε διάφορες τοπολογίες και διαφορετικά περιβάλλοντα. Αναφορικά οι ερευνητές [9] μελέτησαν διάφορες παραλλαγές του TCP μαζί με το TCP New Reno σε μια πολύ αναλυτική εργασία. Διαπίστωσαν ότι δεν μπορούν όλες οι παραλλαγές του TCP δεν είναι δίκαιες (fair) μεταξύ τους προς την κατανομή του bandwidth όταν συνυπάρχουν. Επίσης το TCP New Reno χρησιμοποιείτε και στις δορυφορικές επικοινωνίες [66, 67]. Διάφορα αναλυτικά μοντέλα έχουν προταθεί για την ανάλυση της αποδοτικότητας όπως στην εργασία [68]. Ενώ η ερευνά [69] ανέλυσαν το TCP New Reno σε δορυφορικά περιβάλλοντα πάνω από το πρωτόκολλο DVB-RCS2.

Γ'.3.2 TCP Westwood

Το TCP Westwood βασίζεται στην λογική της εκτίμησης του διαθέσιμου bandwidth μέσα από το μονοπάτι που έχει η σύνδεση στο δίκτυο. Αυτό το επιτυγχάνετε εξάγοντας την πληροφορία μέσα από την ροή των ACKs που επιστρέφονται στον αποστολέα, για τον υπολογισμό του bandwidth estimator B . Το TCP Westwood χρησιμοποιεί τις μεταβλητές $cwnd$, $ssthresh$, RTT της σύνδεσης, την ελάχιστη μέτρηση του RTT από τον αποστολέα (RTT_{min}) και το μέγεθος των δεδομένων που σταλθήκαν (seg_size). Ο εκτιμητής B χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό την πληροφορία σε μια χρονική στιγμή έχει παραλειφθεί το ACK και την αύξηση των δεδομένων που παραδοθήκαν στον παραλήπτη. Το TCP Westwood είναι ένα τροποποιούμενο TCP Reno από την πλευρά του αποστολέα. Ο εκτιμητής B χρησιμοποιείτε για να προσαρμόσει την μείωση του $cwnd$ και το $ssthresh$ μετά από timeout ή τρία διπλοτυπία ACKs. Η λογική περιγράφεται παρακάτω:

$$ssthresh = (B * RTT_{min}) / seg_size \quad (\Gamma'.5)$$

1. Όταν ο αποστολέας λάβει τρία διπλότυπα ACK τότε θα υπολογίσει το *ssthresh* με βάση τον τύπο Γ'.5. Αν το *ssthresh* είναι μεγαλύτερο του 2 τότε θέτει το *ssthresh* = 2. Τέλος θα θέσει το *cwnd* ίσο με το *ssthresh*.
2. Αν προκληθεί κάποιο *timeout* τότε υπολογίζετε την νέα του τιμή του *ssthresh* με βάση τον τύπο Γ'.5. Αν το *ssthresh* είναι μεγαλύτερο του 2 τότε θέτει το *ssthresh* = 2. Τέλος το *cwnd* παίρνει την τιμή 1.
3. Κατά την παραλαβή του ACK το *cwnd* αυξάνεται με βάση τους αλγορίθμους του TCP Reno και υπολογίζεται ο εκτιμητής *B*.

Το TCP Westwood χρησιμοποιήσει την εκτίμηση του διαθέσιμου bandwidth από τον εκτιμητή *B* για να θέσει το *cwnd* μετά την συμφόρηση. Αυτό το κάνει υπολογίζοντας ένα δείγμα του bandwidth $b_k = b_k / (t_k - t_{k-1})$ για κάθε χρονική στιγμή t_k που ο αποστολέας δέχεται το ACK, όπου το $t_k - t_{k-1}$ είναι το ενδιάμεσος χρόνος που ελήφθει, d_k είναι το μέγεθος των δεδομένων που έχουν επιβεβαιωθεί από το ACK. Το δείγμα του bandwidth b_k φιλτράρατε χρησιμοποιώντας διακριτό χρονικό low pass filter όπου bandwidth υπολογίζεται ως:

$$\hat{b}_k = \frac{2\tau - \Delta_k}{2\tau + \Delta_k} \hat{b}_{k-1} + \frac{\Delta_k}{2\tau + \Delta_k} (b_k + b_{k-1}) \quad (\Gamma'.6)$$

Το Δ_k είναι το ενδιάμεσο χρονικό διάστημα άφιξης μεταξύ του $(k-1)th$ και του kth δείγματος και το τ είναι το όριο του κατωφλιού για το φίλτρο όπου συνήθως ορίζεται στα 0.5sec. Το low pass filter είναι αναγκαίο λόγω των δειγματοληπτικών μετρήσεων που παίρνονται. Το TCP Westwood περιγράφεται από την εργασία των ερευνητών [70] και ενδεικνύεται για ασύρματα δικτυακά περιβάλλοντα. Η ερέυνα [9] παρουσίασε ότι μπορούν να συνυπάρξουν οι TCP συνδέσεις New Reno και Westwood χωρίζοντας το bandwidth δικαία μεταξύ τους.

Έχει προταθεί μια διαφορετική παραλλαγή του TCP Westwood που ονομάζεται TCP Westwood+ και έχει μικρή διάφορα στον τρόπο που υπολογίζει την εκτίμηση του bandwidth *B*. Οι ερευνητές στην εργασία [71] έδειξαν ότι έχει καλύτερη απόδοση σε ασύρματα και ενσύρματα δίκτυα από το TCP Reno και προσθέσει καλύτερη κατανομή στο bandwidth.

Γ'.3.3 TCP Hybla

Αρκετά πρωτοκολλά μεταφοράς δεν έχουν καλή απόδοση σε συνδέσεις οι οποίες έχουν υψηλό ρυθμό σε σφάλματα και μεγάλο propagation delay όπως οι δορυφορικές επικοινωνίες και συγκεκριμένα επίγεια δίκτυα. Η βασική ιδέα του TCP Hybla είναι να χρησιμοποιηθεί για συνδέσεις με μεγάλο RTT όπως δορυφορικές και ασύρματες επικοινωνίες προσπαθώντας να επιτύχει τον ίδιο ρυθμό μεταδόσεις συγκριτικά με τις γρήγορες ενσύρματες συνδέσεις. Το TCP Hybla τους χρησιμοποιεί ίδιους μηχανισμούς με το TCP New Reno άλλα ανανεώνει με διαφορετικό τρόπο το cwnd όταν εκτελεί Slow Start και Congestion Avoidance. Το TCP Hybla παρουσιάζει το εξομαλυνόμενο RTT ρ όπου ορίζετε ως:

$$\rho = RTT/RTT_0 \quad (\Gamma'.7)$$

Όπου το RTT_0 ο χρόνος που χρειάζεται να ολοκληρώση round trip time στην αναφερόμενη σύνδεση με σκοπό να εξισορροπήσει την απόδοση της σύνδεσης που θα χρησιμοποιηθεί. Με W^H συμβολίζουμε τους κανόνες που ανανεώσουν το cwnd με βάση το ρ για το TCP Hybla. Κάθε φορά που λαμβάνετε κάποιο ACK το TCP Hybla ανανεώνει το cwnd με του παρακάτω κανόνες:

$$W_{i+1}^H = \begin{cases} W_i^H + 2^\rho - 1, & \text{Slow Start} \\ W_i^H + \frac{\rho^2}{W_i^H}, & \text{Congestion Avoidance} \end{cases} \quad (\Gamma'.8)$$

Ο δείκτης i συμβολίζει την παραλαβή του i th ACK από το TCP του αποστολέα. Το RTT όσο αυξάνεται παράλληλα αυξάνεται και το ρ με αυτόν τον τρόπο το TCP Hybla μπορεί να διατηρήσει υψηλό throughput ακόμα και αν το RTT είναι υψηλό. Το TCP Hybla στην εργασία [7] που περιγράφεται οι ερευνητές προτείνουν την χρήση των μηχανισμών Lose Recovery όπως τα Selective Acknowledgment (SACK). Η χρήση του μηχανισμού SACK επιτρεπτή να ενημερώσει τον αποστολέα για όλα τα πακέτα τα οποία έχουν παραδοθεί επιτυχώς, επιτρέποντας στον αποστολέα να στείλει περισσότερα χαμένα πακέτα ανά RTT. Τα αποτελέσματα από το αναλυτικό μοντέλο το οποίο προτείνουν οι ερευνητές για το TCP Hybla [72] δείχνει να ταιριάζουν τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις και το emulation με 3% απόκλιση από το αναλυτικό μοντέλο. Το αναλυτικό μοντέλο το οποίο έχει προταθεί παρουσιάζεται να εξηγεί πολύ καλά το TCP Hybla και την απόδοση που έχει σε δορυφορικά δίκτυα.

Γ'.4 CoAP και MQTT

Το Constrained Application Protocol (CoAP) και το (Message Queue Telemetry Transport) (MQTT) είναι πρωτοκολλά μεταφοράς τα οποία χρησιμοποιούνται από συσκευές του Internet of Things(IoT). Τα πρωτοκολλά αυτά είναι σχεδιασμένα ώστε να παρέχουν αποδοτική χρήση του Bandwidth και της κατανάλωσης ενεργείας για τις συσκευές που τα χρησιμοποιούν.

Το CoAP πρωτοκολλώ περιγράφεται από το ανοικτό στάνταρ [10] και είναι προσαρμοσμένο για μεταφορά εγγράφων για επικοινωνίες M2M. Το CoAP χρησιμοποιεί το μοντέλο request - response χρησιμοποιώντας το UDP για την μεταφορά των μηνυμάτων. Επειδή το UDP είναι αναξιόπιστο πρωτόκολλο μεταφοράς, το CoAP παρέχει τον δικό του μηχανισμό. Τα μηνύματα τα οποία χρησιμοποιεί ο μηχανισμός για παρέχει αξιοπιστία είναι ονομαστικά Confirmable, Non-confirmable, Acknowledgement και Reset. Τα Confirmable μηνύματα πρέπει να επιβεβαιωθούν από την άκρη τις σύνδεσης ενώ τα Non-confirmable μηνύματα δεν χρειάζονται επιβεβαίωση.

Το MQTT πρωτόκολλο [11] έχει προταθεί το 1999 ως ένα ελαφρύ και αξιόπιστο πρωτόκολλο για την μεταφορά των μηνυμάτων χρησιμοποιώντας την αρχιτεκτονική του μοντέλου publish-subscribe. Το μοντέλο μπορεί να περιγράψει από τις συσκευές οι οποίες θέλουν να μεταδώσουν M μηνύματα για ένα συγκεκριμένο θέμα T και από τις συσκευές που είναι εγγεγραμμένες σε αυτό το θέμα οι οποίες θα λάβουν τα M μήνυμα που έχουν σταλθεί. Την αξιοπιστία την επιτυγχάνει χρησιμοποιώντας το TCP ως βάση. Το MQTT έχει την δυνατότητα να επιλέξει ένα από τρία επίπεδα του Quality of Service(QoS) για την μεταφορά των μηνυμάτων. Τα οποία περιγράφονται παρακάτω:

1. QoS0 : Το πρωτόκολλο θα μεταδώσει μόνο μια φορά το μήνυμα. Όταν παραδοθεί το μήνυμα δεν απαιτείται επιβεβαίωση. Το μήνυμα ωστόσο μπορεί να χαθεί ή παραδοθεί διπλότυπο. Με αυτήν την επιλογή επιτυγχάνεται η γρηγορότερη δυνατή μετάδοση.
2. QoS1 : Το πρωτόκολλο θα μεταδώσει τουλάχιστον μια φορά το μήνυμα. Απαιτείται από κατά την παραλαβή η επιβεβαίωση του μηνύματος. Αν χαθεί ή δεν πάρει την επιβεβαίωση τότε θα το επαναμετάδοση.
3. QoS2 : Το πρωτόκολλο θα μεταδώσει μόνο μια φορά το πακέτο άλλα εγγύτατε ότι δεν προκύπτει να δημιουργηθεί κάποιο διπλότυπο πακέτο χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό four-way handshake.

Τα δορυφορικά δίκτυα μπορούν να συμβάλουν στην σύνδεση των IoT συσκευών οι οποίες είναι γεωγραφικά διασκορπισμένες στο χώρο. Επειδή μπορούν να προσθέσουν μεγάλη κάλυψη και να χρησιμοποιήσουν τις υποδομές τους σε περιοχές οι οποίες δεν είναι ακόμα οικονομικά βιώσιμη η κατασκευή επιγείων δικτύων. Αρκετές έρευνες [73, 23] έχουν γίνει για την αξιοποίησή και την αποδοχή των δορυφορικών δικτύων και την σύνδεση τους με τις IoT συσκευές, ο συγκεκριμένος ερευνητικός χώρος ονομάζεται Satellite IoT (SAT-IoT) .

Σύμφωνα με την εργασία [74] τα δορυφορικά δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα πεδία όπως για την αντιμετώπιση των φυσικών καταστροφών, στην έξυπνη αγροκαλλιέργεια, έξυπνη υγειονομική περίθαλψη καθώς και σε άλλες εφαρμογές των IoT. Έχει προταθεί [12] η απάνθειας επικοινωνία των IoT συσκευών με τους δορυφόρους ωστόσο θα πρέπει το υλικό θα πρέπει να μπορεί μεταδώσει σε αρκετά μεγάλη απόσταση ($> 550km$) και οι συσκευές θα πρέπει να είναι σχετικά φθηνές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι συσκευές αυτές να έχουν μικρό ρυθμό μεταφοράς δεδομένων όπου στο συγκριμένο σενάριο είναι αποδεκτό και η χρήση των πρωτόκολλων CoAP και MQTT φαίνεται να είναι κατάλληλη.

Κεφάλαιο Δ΄

Πειράματα και αποτελέσματα

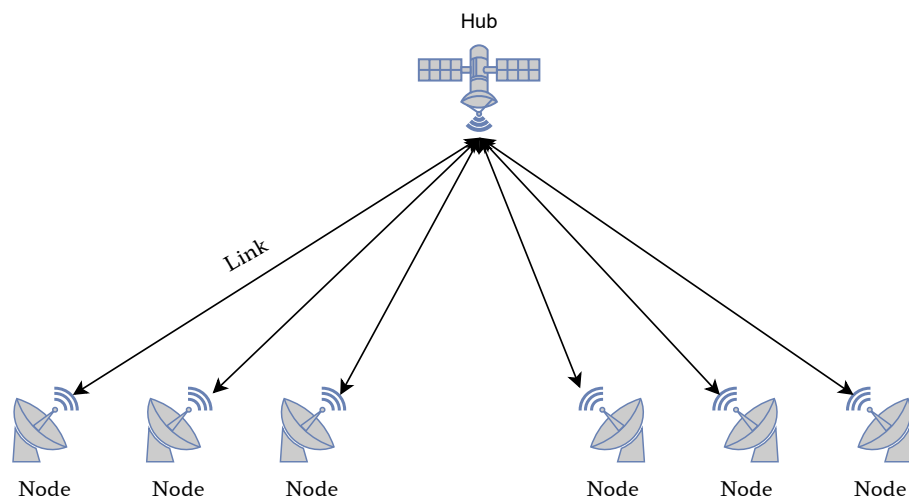
Σε αυτό το κέφαλο θα παρουσιαστούν τα πειράματα που πάρθηκαν, τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν, καθώς και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκαν. Θα αναφερθούμε σε δυο κατηγορίες πειραμάτων τα οποία έγιναν καθώς και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση των πρωτοκόλλων μεταφοράς. Πιο συγκεκριμένα θα εξετάσουμε τα πρωτοκολλά μεταφοράς TCP New Reno, Westwood και Hybla .

Δ΄.1 Ανάλυση περιβάλλοντός

Για την προσομοίωση των πρωτοκόλλων μεταφοράς χρησιμοποιήθηκε ο network simulator ανοικτού λογισμικού Omnet++ [75] μαζί με το framework ανοικτού λογισμικού INET [76]. Ο λόγος που επιλέχθηκε η χρήση του INET είναι ότι μπορεί να προσφέρει προσομοιώσεις μεγάλης ακρίβειας, όσων αφορά τα πραγματικά δίκτυα, στη χρήση πρωτοκόλλων.

Για όλα τα πειράματα που υλοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκε η τοπολογία αστέρα. Αυτό σημαίνει ότι ένας κόμβος είναι συνδεδεμένος με όλους τους υπολοίπους κόμβους και συνήθως αυτός ο κόμβος ονομάζεται Hub, καθώς στα δορυφορικά δίκτυα αυτή η τοπολογία είναι αρκετά διαδεδομένη. Στο σχήμα Δ΄.1 παρουσιάζετε η τοπολογία αστέρα. Στα πειράματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν δε μοντελοποιούνται τα επίπεδα Physical, Data link και Network για λόγους απλότητας. Δηλαδή δε χρησιμοποιείται κάποιος γνωστός αλγόριθμός για modulation και forward error correction όπως χρησιμοποιούνται στις ρεαλιστικές δορυφορικές τηλεπικοινωνίες. Αυτό σημαίνει ότι

τα πακέτα που λαμβάνονται θα είναι πλήρως κατεστραμμένα σε περίπτωση σφάλματος. Επίσης στα πειράματα τα οποία έγιναν έχουν χρησιμοποιηθεί μεγάλες τιμές στο Delay του καναλιού για τη μετάδοση των πακέτων. Στόχος μέσα από αυτές τις επιλογές είναι η μελέτη του επίπεδου μεταφοράς σε ένα απλοποιημένο δορυφορικό κανάλι εξετάζοντας την συμπεριφορά του TCP, New Reno, Westwood και Hybla.



Σχήμα Δ'.1: Σχηματική αναπαράσταση της τοπολογίας αστέρα

Πρέπει να επισημανθεί ότι στα πειράματα τα οποία έγιναν οι κόμβοι που είναι συνδεδεμένοι πάνω στον δορυφόρο έχουν το δικό τους bandwidth, το οποίο δεν επηρεάζεται από τους υπολοίπους κόμβους. Η πιθανότητα να καταστραφεί ένα πακέτο είναι ίδια σε όλες τις διασυνδέσεις.

Για να εξετάσουμε την απόδοση των TCP δημιουργήσαμε σενάρια μεταφοράς αρχείων από τον έναν κόμβο στον άλλον. Με άλλα λόγια χρησιμοποιήσαμε το (FTP) με διαφορετικά TCP. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 63 διαφορετικά πειράματα με διαφορετικές παραμέτρους. Στα πρώτα 51 πειράματα εξετάσαμε την τοπολογία αστέρα για 10, 25 και 50 κόμβους. Οι παράμετροι που δώσαμε για το μέγεθος του αρχείου είναι 100, 500 και 1000KiB. Το delay του καναλιού ορίστηκε στα 100ms, επομένως το RTT της σύνδεσης είναι στα 200ms. Η παράμετροι για το error rate κατά τη μεταφορά των πακέτων είναι 0.0, 0.1, 0.2.

Τα υπόλοιπα 12 πειράματα πραγματοποιήθηκαν με error rate 0.2 σε 10, 25 και 50 κόμβους, μέγεθος αρχείων 100, 500 και 1000KiB. Εξετάστηκε το πώς το delay για 200ms και 300ms επηρεάζει τα TCP New Reno, Westwood και Hybla.

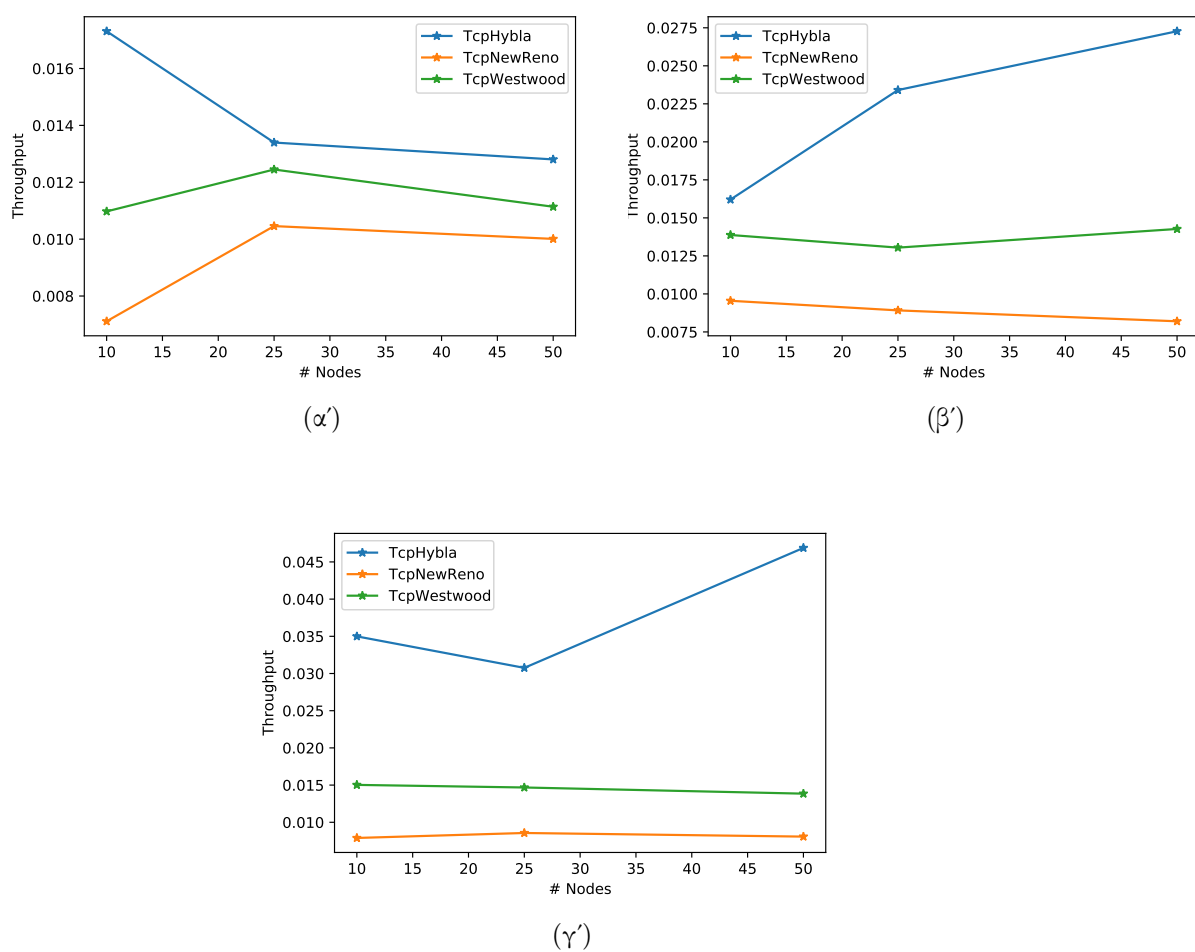
Άλλες παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για όλα τα TCP είναι το MSS, σταθερό και ίσο με 1452byte, το bandwidth που διαμερίζονται όλοι οι κόμβοι και είναι ίσο με 100Gbps. Ο κάθε κόμβος έχει στην διάθεση του ισόποσο bandwidth με όλους τους άλλους κόμβους. Ο λόγος που επιλέχτηκε μια τόσο υψηλή τιμή στο bandwidth είναι ότι θέλουμε να δούμε την συμπεριφορά των TCP μόνο σε απώλειες από το error rate του καναλιού και όχι από την συμφόρηση στο κανάλι. Το RTT_0 έχει τεθεί στα 50ms για όλα τα πειράματα τα οποία έχουν γίνει.

Δ'.2 Πειράματα

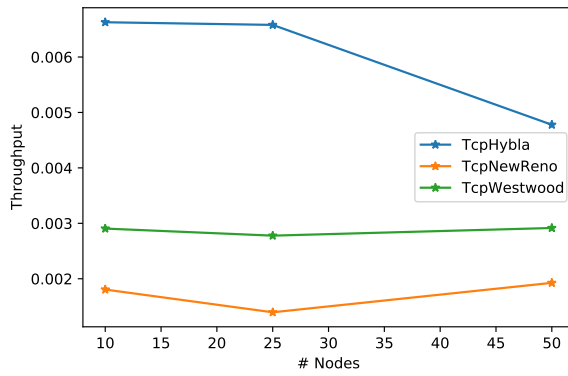
Μια μετρική για την απόδοση των δικτύων είναι το Throughput που δείχνει ρυθμό των δεδομένων που μεταφέρεται μέσα στο κανάλι. Υπολογίζεται από το μέγεθος των δεδομένων που θέλουμε να στείλουμε προς τον χρόνο.

Στο σχήμα Δ'.2 παρουσιάζονται 3 διαφορετικά διαγράμματα ανάλογα με το μέγεθος του αρχείου και το μέσο Throughput, για τους 10, 25 και 50 κόμβους ανά διαφορετική υλοποίηση του TCP με error rate 0.1. Ο άξονας του Throughput μετρείται σε *Mps*. Παρατηρούμε και από τα τρία διαγράμματα ότι το TCP Hybla έχει το υψηλότερο μέσο Throughput. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι χρησιμοποιεί διαφορετικές συναρτήσεις για την αύξηση του cwnd στο Slow Start και Congestion Avoidance σε σχέση με το New Reno και το Westwood. Παρατηρείται επίσης σε αυτά τα διαγράμματα πώς πραγματοποιείται η αύξηση του μέσου Throughput όσο αυξάνετε και το μέγεθος του αρχείου, κάτι που είναι φυσικό γιατί αυξάνεται το μέγεθος των δεδομένων που εισέρχονται στο δίκτυο. Επίσης και στα τρία διαγράμματα υπάρχει ένα κοινό μοτίβο. Το υψηλότερο μέσο Throughput συνολικά το έχει το TCP Hybla, στη συνέχεια το TCP Westwood και τέλος το TCP New Reno.

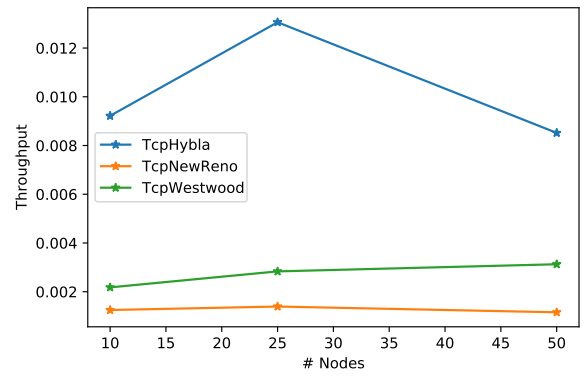
Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούνται στο σχήμα Δ'.3 όπου παρουσιάζεται το μέσο Throughput για error rate 0.2. Το μέσο Throughput είναι χαμηλότερο από το προηγούμενο σχήμα διότι όσο αυξάνεται το error rate, αυξάνονται οι επαναμεταδόσεις των χαμένων πακέτων με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο χρόνος για να μεταδοθούν τα αρχεία. Παρατηρείτε επίσης από τα σχήματα Δ'.2 και Δ'.3 ότι το TCP New Reno και Westwood έχουν πανομοιότυπη συμπεριφορά. Τα διαγράμματα με error rate 0.0 έχουν παραλειφθεί διότι όλες οι παραλλαγές του TCP έχουν σταθερό Throughput και δεν αλλάζει με την αύξηση των κόμβων. Πρέπει να σημειωθεί ότι το TCP Hybla ήταν πιο πάνω από TCP New Reno και Westwood τα οποία συνέπιπταν.



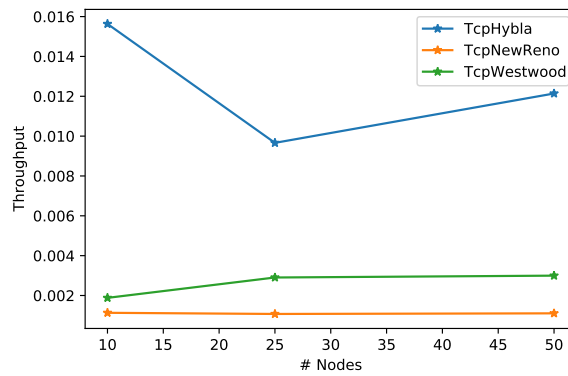
Σχήμα Δ'.2: Μέσο Throughput των κόμβων για error rate = 0.1. Με μέγεθος αρχείου Δ'.2α' : 100KiB , Δ'.2β' : 500KiB και Δ'.2γ' : 1000KiB



(α')

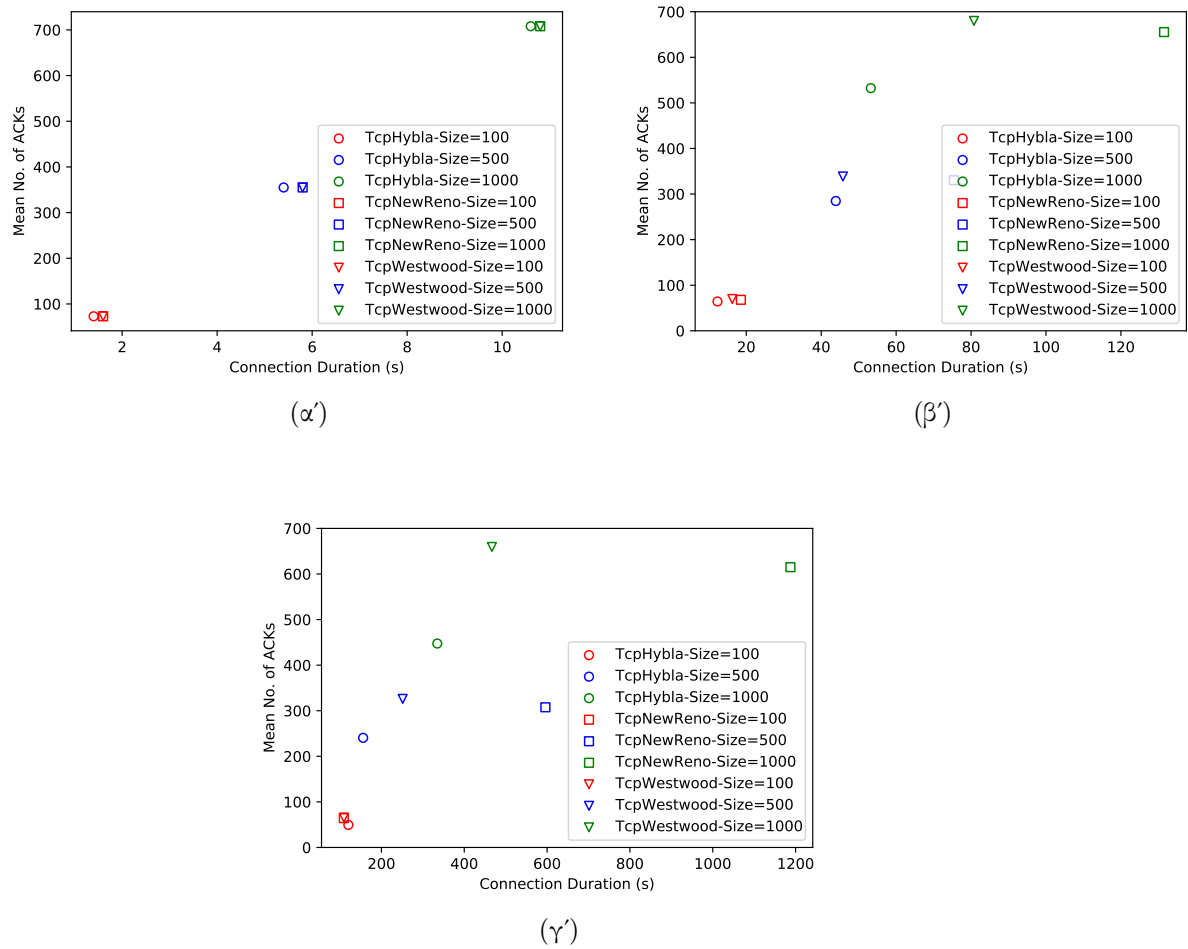


(β')



(γ')

Σχήμα Δ'.3: Μέσο Throughput των κόμβων για error rate = 0.2. Με μέγεθος αρχείου Δ'.3α' : 100KiB , Δ'.3β' : 500KiB και Δ'.3γ' : 1000KiB

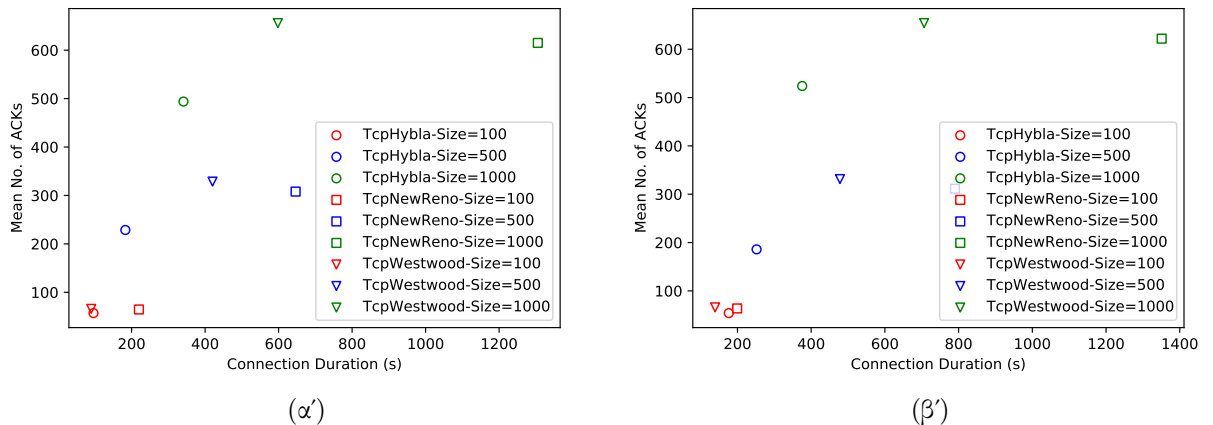


Σχήμα Δ'.4: Μέσος αριθμός Acks προς μέσο χρόνο για αρχεία μεγέθους 100, 500, 1000*Kib* και error rate στο Δ'.4α' 0.0, Δ'.4β' 0.1 και Δ'.4β' 0.2

Στο σχήμα Δ'.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων με delay $100ms$ για τον μέσο αριθμό Acks που έχει λάβει ο αποστολέας για 50 κόμβους και για διαφορετικά μεγέθη αρχείων. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται 9 διαφορετικά για πειράματα. Στο διάγραμμα Δ'.4α' παρουσιάζονται αποτελέσματα για error rate 0.0 και βλέπουμε ότι όλα τα TCP έχουν το ίδιο μέσο αριθμό Acks επειδή δε χάνετε κανένα πακέτο από το κανάλι. Ωστόσο το TCP Hybla τελειώνει πάντα νωρίτερα από τα υπόλοιπα TCP γεγονός που είναι λογικό, λόγω του αλγορίθμου Slow Start που αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό σε σχέση με τα άλλα TCP. Δεν παρατηρείται διάφορα ανάμεσα στο TCP New Reno και Westwood διότι χρησιμοποιούν τον ίδιο αλγόριθμο Slow start εφόσον δεν έχουμε απώλειες πακέτων.

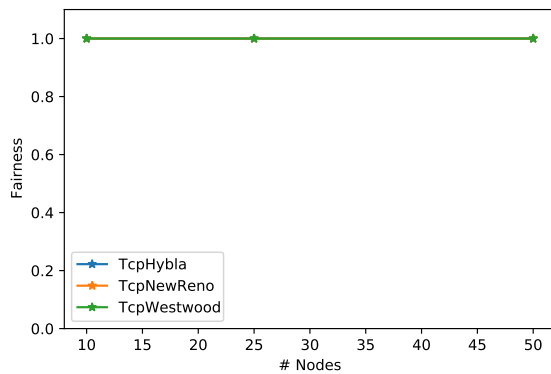
Στο διάγραμμα Δ'.4β' οι διαφορές ανάμεσα στα TCP τα οποία συγκρίνουμε φαίνεται καλύτερα διότι το error rate είναι 0.1 και κάθε TCP εφαρμόζει τους δικούς τους αλγορίθμους για τα retransmissions. Παρατηρούμε ότι TCP Hybla σε όλες τις περιπτώσεις τελειώνει νωρίτερα στην αποστολή του εκάστοτε αρχείου. Για το μέγεθος αρχείου $1000Kib$ βλέπουμε πιο ξεκάθαρα ότι το TCP Westwood χρειάζεται λιγότερο μέσο χρόνο για να τελειώσει την μεταφορά σε σχέση με το TCP New Reno.

Για το διάγραμμα Δ'.4β' παρουσιάζονται τα πειράματα που έγιναν για error rate 0.2. Παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά με το προηγούμενο διάγραμμα και γίνεται ακόμα πιο εμφανές το διάστημα του μέσου χρόνου που χρειάζεται για να μεταδώσει ένα αρχείο $1000Kib$ TCP New Reno σε σχέση με τα υπόλοιπα TCP.

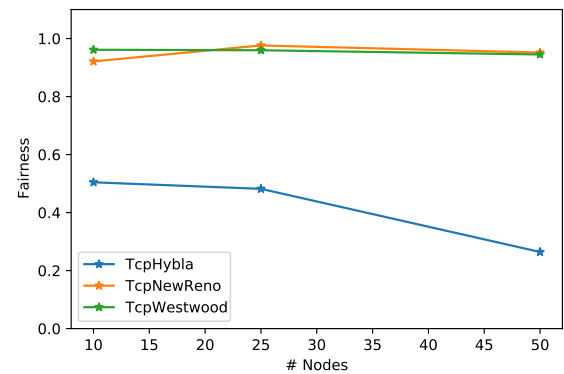


Σχήμα Δ'.5: Μέσος αριθμός Acks προ τον μέσο χρόνο για error rate 0.2, μέγεθος αρχείων 100, 500, $1000Kib$ για 50 κόμβους. Delay Δ'.5α' : $200ms$, Δ'.5β' : $300ms$.

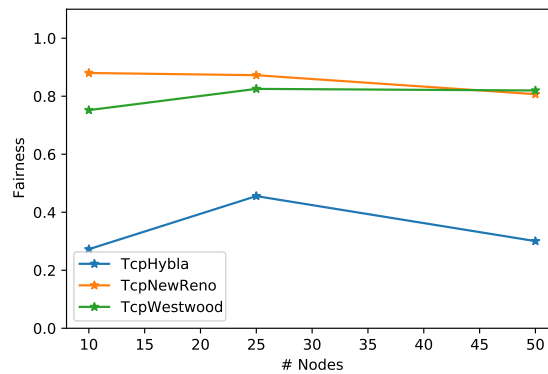
Στο σχήμα Δ'.5 παρουσιάζεται ο μέσος χρόνος μεταφοράς των αρχείων ως προ το μέσο αριθμό Acks για 50 κόμβους, error rate 0.2 για 200ms και 300ms delay στο κανάλι. Στο διάγραμμα Δ'.5α' παρατηρείτε ότι για μέγεθος 100Kib το TCP Hybla και Westwood έχουν παρόμοια απόδοση. Συνολικά στο σχήμα Δ'.5 βλέπουμε την ίδια συμπεριφορά των TCP με τα διαγράμματα του σχήματος Δ'.4.



(α')



(β')



(γ')

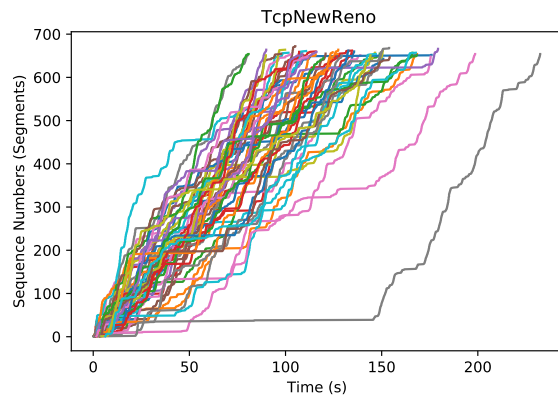
Σχήμα Δ'.6: Το fairness των TCP για 1000Kib μέγεθος αρχείου για error rate Δ'.6α' 0.0, Δ'.6β' 0.1 και για Δ'.6γ' 0.2

Μια ακόμα πολύ σημαντική μετρική για την απόδοση των TCP είναι το Jain fairness index το οποίο δείχνει πόσο δίκαια γίνεται η κατανομή του bandwidth σε σχέση με το πλήθος των συνδέσεων που χρησιμοποιούνται. Υπολογίζεται με βάση το Throughput που έχει ο κάθε κόμβος [77] :

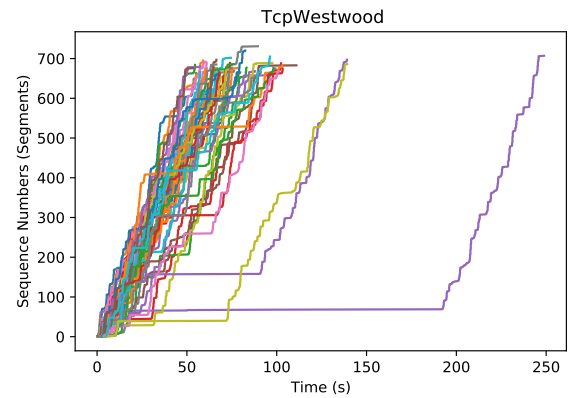
$$J_{FI} = \frac{(\sum x_i)^2}{n \sum x_i^2} \quad (\Delta'.1)$$

Όπου x_i είναι το Throughput του κόμβου i και n ο αριθμός των κόμβων, το fairness παίρνει τιμές από το 0 έως 1 και όσο πιο υψηλά βρίσκεται ο δείκτης σημαίνει ότι γίνεται πιο δίκαια η κατανομή του bandwidth. Στο διάγραμμα Δ'.6α' παρατηρούμε ότι όλα τα TCP είναι δίκαιο ανεξάρτητα από τον αριθμό των κόμβων. Κάτι το οποίο είναι φυσικό διότι δεν υπάρχουν σφάλματα κατά την μετάδοση. Στο διάγραμμα Δ'.6β' παρατηρούμε ότι για error rate 0.1 το TCP Hybla δεν είναι δίκαιο ως προς όλες τις συνδέσεις καθώς όσο αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων το fairness μειώνεται. Αντίθετα το TCP New Reno και Westwood έχουν αρκετά υψηλό fairness το οποίο μένει αρκετά κοντά στο 1.0. Τέλος στο διάγραμμα Δ'.6γ' για error rate 0.2 έχουμε το ίδιο μοτίβο με το TCP Hybla να έχει το μικρότερο fairness. Ωστόσο το TCP New Reno είναι πιο δίκαιο για 10 και 25 κόμβους σε σχέση με το TCP Westwood αλλά όσο αυξάνονται ο αριθμός των κόμβων φαίνεται να πλησιάζει το TCP New Reno.

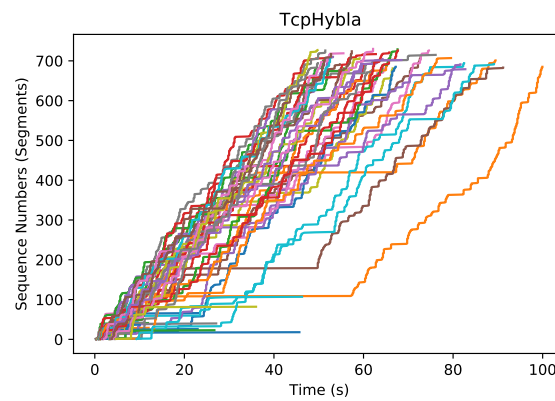
Τέλος στο σχήμα Δ'.7 παρουσιάζονται σε διαγράμματα η αύξηση του Seqense number σε Segment ως προς τον χρόνο για τις 50 συνδέσεις με delay 100ms και error rate 0.1 που έχει κάθε TCP που μελετάμε. Βλέπουμε ότι όλες οι συνδέσεις δεν τελειώνουν την ίδια χρονική στιγμή γεγονός που οφείλεται στο error rate που έχει το κάθε κανάλι. Το TCP Hybla και το Westwood φαίνεται να αυξάνουν τα sequence numbers με παρόμοιο ρυθμό αλλά συνολικά το TCP Hybla τελειώνει πιο γρήγορα στην μεταφορά. Παρατηρούμε σε όλα τα διαγράμματα ότι μερικές συνδέσεις παραμένουν αρκετή ώρα με το ίδιο sequence number και αυτό οφείλεται στους αντίστροφους μετρητές που χρησιμοποιεί το TCP για να επαναμεταδώσει την πληροφορία αν λήξει ο χρόνος. Κάθε φορά που λήγει ο χρόνος επαναμεταδίδεται το πακέτο που χάθηκε και διπλασιάζεται ο χρόνος τον αντίστροφο μετρητή, γεγονός το οποίο οδηγεί σε μια εκθετική συμπεριφορά backoff. Για αυτό το λόγο παρατηρούμε να μένει στην ίδια ευθεία το sequence number για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Τέλος στο διάγραμμα Δ'.7α' για το TCP Hybla παρατηρείται ότι μερικές συνδέσεις δεν έχουν ολοκληρώσει όλη την μεταφορά του αρχείου 1000Kib με αποτέλεσμα να κλείσουν την σύνδεση. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι το TCP έχει προσπαθήσει να επαναμεταδώσει αρκετές φορές το πακέτο χωρίς αυτό να καταφέρει να φτάσει στον παραλήπτη. Στην υλοποίηση του TCP που χρησιμοποιεί το framework INET, όταν λήξει ο αντίστροφος μετρητής 12 φορές χωρίς να έχει πάρει απάντηση από την άλλη πλευρά η σύνδεση τερματίζει. Η άλλη περίπτωση είναι να



(α')



(β')



(γ')

Σχήμα Δ'.7: Τα Sequence Numbers των TCP σε segmanets για 50 συνδέσεις με error rate 0.1 και μεγεθος αρχείου 1000Kib

οφείλεται σε αστοχία υλοποίησης του TCP Hybla. Είναι κάτι το οποίο δεν μπορούμε να πούμε με σιγουριά σε πια περίπτωση ανήκει διότι τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μία επανάληψη στον simulator. Αυτό μπορεί να απαντηθεί στο μέλλον κάνοντας πολλαπλές επαναλήψεις για το ίδιο πείραμα και παίρνοντας τους μέσους ορούς για να εξαλείψει η τυχαιότητα.

Κεφάλαιο Ε΄

Σύνοψη και Συμπεράσματα

Το κύριο αντικείμενο ανάλυσης και υλοποίησης αυτής της διπλωματικής υπήρξαν τα πρωτόκολλα μεταφοράς σε δορυφορικά περιβάλλοντα. Η σημασία των πρωτοκόλλων μεταφοράς σε αυτού του είδους τα περιβάλλοντα είναι ιδιαίτερα υψηλή, δεδομένης της πρόσφατης επιτυχίας τους στον εμπορικό τομέα, με χαρακτηριστικό παράδειγμα το Starlink.

Συνεπώς, επιλέχθηκαν τρία διαφορετικά πρωτόκολλα, τα New Reno, Westwood και Hybla, τα οποία συναντώνται συχνά σε δορυφορικά περιβάλλοντα. Οι μηχανισμοί των πρωτοκόλλων αυτών διαφέρουν σε αρκετά σημεία, τα οποία τονίζονται στην παρούσα διπλωματική, ενώ ταυτόχρονα τους προσδίδουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, καθιστώντας το καθένα κατάλληλο υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Τα επιλεγόμενα πρωτόκολλα αξιολογούνται πειραματικά σε περιβάλλον προσομοίωσης, ώστε να φανεί κατά πόσο αυτά συνάδουν με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας αλλά και να συγκριθεί η μεταξύ τους απόδοση υπό διαφορετικές συνθήκες. Έτσι, επιλέγεται μία γκάμα παραμέτρων που αφορούν τόσο την τοπολογία και το μέγεθος του δικτύου, τα χαρακτηριστικά του καναλιού, αλλά και τον όγκο των δεδομένων προς μεταφορά.

Από την πειραματική αξιολόγηση, προκύπτει πως παρά τους περιορισμούς του περιβάλλοντος προσομοίωσης, το Hybla παρέχει υψηλότερο throughput στις περισσότερες περιπτώσεις, εφόσον επιλεγούν κατάλληλα οι παράμετροι λειτουργίας του. Η υψηλότερη απόδοση ως προς τη συγκεκριμένη μετρική οφείλεται στο μηχανισμό slow start που οδηγεί στην αύξηση του congestion window με υψηλότερο ρυθμό. Αντίστοιχα, το Westwood συμπεριφέρεται και προσαρμόζεται καλύτερα στις απώλειες των πακέτων

σε σχέση με το New Reno. Είδαμε επίσης ότι TCP Hybla δεν είναι δίκαιο ως προς την κατανομή του bandwidth σε σχέση με το TCP New Reno και Westwood. Όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρατηρήθηκε μια συμπεριφορά στο TCP Hybla, όπου μερικές συνδέσεις δεν κατάφεραν να μεταδώσουν όλο τον όγκο των δεδομένων που είχαν να μεταφέρουν. Αυτό μπορεί να προκύπτει από επαναλαμβανόμενες αποτυχημένες μεταδόσεις οι οποίες ξεπερνούν το όριο των επιτρεπτών προσπαθειών με αποτέλεσμα το TCP να κλείσει την σύνδεση. Η άλλη περίπτωση είναι η συμπεριφορά αυτή να οφείλεται σε αστοχία υλοποίησης. Μελλοντικά, συνετό θα ήταν να γίνουν περισσότερες επαναλήψεις για το ίδιο πείραμα για να προσδιοριστούν τα αίτια αυτής της συμπεριφοράς.

Συνεπώς τα πρωτόκολλα που επιλέχθηκαν έχουν απόδοση που είναι κοντά στην αναμενόμενη. Παρά ταύτα, η αξιολόγηση θα μπορούσε να επεκταθεί στο μέλλον με διάφορους τρόπους. Σημαντική βελτίωση θα αποτελούσε η προσομοίωση ενός ασύρματου φυσικού μέσου το οποίο να διαμοιράζονται οι κόμβοι, οδηγώντας σε συγκρούσεις κατά τη μετάδοση, όπως συμβαίνει και στην πραγματικότητα. Ακόμη, μία μεγαλύτερη γκάμα πρωτοκόλλων θα μπορούσε να αξιολογηθεί, ενώ η μεγαλύτερη ποικιλία συνθηκών ίσως αναδείκνυε σημαντικές διαφορές μεταξύ αυτών. Επίσης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το framework ESTNeT [78] το οποίο μπορεί να προσομοιώσει ακόμα πιο ρεαλιστικά τα δορυφορικά περιβάλλοντά. Επιπλέον, θα μπορούσαν να αξιολογηθούν ακόμη τα πρωτόκολλα τύπου CoAP και MQTT.

Βιβλιογραφία

- [1] M. S. Snow, “Natural monopoly in intelsat: cost estimation and policy implications for the separate systems issue,” *Telematics and Informatics*, vol. 4, no. 2, pp. 133–150, 1987.
- [2] J. A. Karikari, S. M. Brown, and A. D. Abramowitz, “Subscriptions for direct broadcast satellite and cable television in the us: an empirical analysis,” *Information Economics and Policy*, vol. 15, no. 1, pp. 1–15, 2003.
- [3] S. P. Dulac and J. P. Godwin, “Satellite direct-to-home,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, no. 1, pp. 158–172, 2006.
- [4] G. V. RESEARCH, “Satellite Communication Market Size Report, 2021-2028.” <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/satellite-communication-market>, 2019. [Online; accessed 30-Sep-2021].
- [5] V. Jacobson, “Congestion avoidance and control,” *ACM SIGCOMM computer communication review*, vol. 18, no. 4, pp. 314–329, 1988.
- [6] M. Alizadeh, A. Greenberg, D. A. Maltz, J. Padhye, P. Patel, B. Prabhakar, S. Sengupta, and M. Sridharan, “Data center tcp (dctcp),” in *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2010 Conference*, pp. 63–74, 2010.
- [7] C. Caini and R. Firrincieli, “Tcp hybla: a tcp enhancement for heterogeneous networks,” *International journal of satellite communications and networking*, vol. 22, no. 5, pp. 547–566, 2004.
- [8] C. Partridge and T. J. Shepard, “Tcp/ip performance over satellite links,” *IEEE network*, vol. 11, no. 5, pp. 44–49, 1997.

- [9] L. A. Grieco and S. Mascolo, “Performance evaluation and comparison of westwood+, new reno, and vegas tcp congestion control,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 34, no. 2, pp. 25–38, 2004.
- [10] Z. Shelby, K. Hartke, and C. Bormann, “The constrained application protocol (coap),” 2014.
- [11] A. N. Andy Stanford-Clark, “Message Queuing Telemetry Transport protocol.” <https://mqtt.org/>, 2013. [Online; accessed 30-July-2021].
- [12] J. A. Fraire, S. Céspedes, and N. Accettura, “Direct-to-satellite iot-a survey of the state of the art and future research perspectives,” in *International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless*, pp. 241–258, Springer, 2019.
- [13] NASA, “Global Positioning System.” <https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS.html>, 2014. [Online; accessed 19-July-2021].
- [14] A. P. Trishchenko and L. Garand, “Spatial and temporal sampling of polar regions from two-satellite system on molniya orbit,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 28, no. 8, pp. 977 – 992, 2011.
- [15] E. M. Alessi, A. Buzzoni, J. Daquin, A. Carbognani, and G. Tommei, “Dynamical properties of the molniya satellite constellation: Long-term evolution of orbital eccentricity,” *Acta Astronautica*, vol. 179, pp. 659–669, 2021.
- [16] R. Akturan, “An overview of the sirius satellite radio system,” *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 26, no. 5, pp. 349–358, 2008.
- [17] J. E. Draim, “Satellite continuous coverage constellations,” Mar. 7 1989. US Patent 4,809,935.
- [18] M. Eng and R. Schwarz, “Keplerian orbit elements - cartesian state vectors,” 2017.
- [19] H. D. Curtis, “Chapter 4 - orbits in three dimensions,” in *Orbital Mechanics for Engineering Students (Fourth Edition)* (H. D. Curtis, ed.), Aerospace Engineering, pp. 181–229, Butterworth-Heinemann, fourth edition ed., 2021.

- [20] A. K. Maini and V. Agrawal, *Satellite technology: principles and applications*. John Wiley & Sons, 2011.
- [21] M. Werner, A. Jahn, E. Lutz, and A. Bottcher, “Analysis of system parameters for leo/ico-satellite communication networks,” *IEEE Journal on Selected areas in Communications*, vol. 13, no. 2, pp. 371–381, 1995.
- [22] K. Y. Zhong, Y. J. Cheng, H. N. Yang, and B. Zheng, “Leo satellite multi-beam coverage area division and beam forming method,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021.
- [23] Z. Qu, G. Zhang, H. Cao, and J. Xie, “Leo satellite constellation for internet of things,” *IEEE access*, vol. 5, pp. 18391–18401, 2017.
- [24] A. Guidotti, “Beam size design for new radio satellite communications systems,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 11, pp. 11379–11383, 2019.
- [25] S. Xia, Q. Jiang, C. Zou, and G. Li, “Beam coverage comparison of leo satellite systems based on user diversification,” *IEEE access*, vol. 7, pp. 181656–181667, 2019.
- [26] A. Buzzoni, J. Guichard, E. M. Alessi, G. Altavilla, A. Figer, A. Carbognani, and G. Tommei, “Spectrophotometric and dynamical properties of the soviet/russian constellation of molniya satellites,” *Journal of Space Safety Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 255–261, 2020.
- [27] R. Sladen’s, “Iridium Constellation Status.” <http://www.rod.sladen.org.uk/iridium.htm>, 2020. [Online; accessed 25-July-2021].
- [28] K. Maine, C. Devieux, and P. Swan, “Overview of iridium satellite network,” in *Proceedings of WESCON’95*, p. 483, IEEE, 1995.
- [29] Iridium, “Iridium Museum exhibits from-beepers-to-broadband.” <https://www.iridiummuseum.com/exhibits/from-beepers-to-broadband/>, 2021. [Online; accessed 25-July-2021].

- [30] J. C. McDowell, “The low earth orbit satellite population and impacts of the spacex starlink constellation,” *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 892, no. 2, p. L36, 2020.
- [31] C. Ene and T. Muntean, “Expressiveness of point-to-point versus broadcast communications,” in *International Symposium on Fundamentals of Computation Theory*, pp. 258–268, Springer, 1999.
- [32] ESA, “Satellite frequency bands.” https://www.esa.int/Applications/Telecommunications_Integrated_Applications/Satellite_frequency_bands, 2020. [Online; accessed 30-July-2021].
- [33] A. Tamo and J. M. P. Fortes, “Satellite interference evaluation: joint effect of modeling earth station locations and earth station antenna sidelobe gains as random variables,” *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 33, no. 6, pp. 491–508, 2015.
- [34] V. F. Milas and P. Constantinou, “Interference environment between high altitude platform networks (hapn), geostationary (geo) satellite and wireless terrestrial systems,” *Wireless Personal Communications*, vol. 32, no. 3, pp. 257–274, 2005.
- [35] D. Tarchi, V. R. Icolari, J. Grotz, A. Vanelli-Coralli, and A. Guidotti, “On the feasibility of interference estimation techniques in cognitive satellite environments with impairments,” in *International Conference on Wireless and Satellite Systems*, pp. 133–146, Springer, 2015.
- [36] E. Biglieri, “An overview of cognitive radio for satellite communications,” in *2012 IEEE First AESS European Conference on Satellite Telecommunications (ESTEL)*, pp. 1–3, IEEE, 2012.
- [37] R. Oliva, E. Daganzo, Y. H. Kerr, S. Mecklenburg, S. Nieto, P. Richaume, and C. Gruhier, “Smos radio frequency interference scenario: Status and actions taken to improve the rfi environment in the 1400–1427-mhz passive band,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 5, pp. 1427–1439, 2012.
- [38] D. J. Torrieri, “Principles of military communication systems,” *Dedham*, 1981.

- [39] R. F. Graf and W. Sheets, *Video Scrambling & Descrambling: For Satellite & Cable TV*. Newnes, 1998.
- [40] R. Lange and B. Smutny, "Optical inter-satellite links based on homodyne bpsk modulation: heritage, status, and outlook," in *Free-Space Laser Communication Technologies XVII*, vol. 5712, pp. 1–12, International Society for Optics and Photonics, 2005.
- [41] Y. Li, M. Li, Y. Poo, J. Ding, M. Tang, and Y. Lu, "Performance analysis of oqpsk, bpsk, qpsk modulation schemes in uplink of ground-to-satellite laser communication system under atmospheric fluctuation," *Optics Communications*, vol. 317, pp. 57–61, 2014.
- [42] P. Sivakumar, M. Singh, J. Malhotra, and V. Dhasarathan, "Performance analysis of 160 gbit/s single-channel pdm-qpsk based inter-satellite optical wireless communication (isowc) system," *Wireless Networks*, vol. 26, no. 5, pp. 3579–3590, 2020.
- [43] M. A. Ismail, W. Dabbous, and A. Clerget, "A multi-burst sliding encoding for mobile satellite tv broadcasting," in *IEEE INFOCOM 2009*, pp. 2676–2680, IEEE, 2009.
- [44] A. J. Viterbi, "Very low rate convolutional codes for maximum theoretical performance of spread-spectrum multiple-access channels," in *The Foundations Of The Digital Wireless World: Selected Works of AJ Viterbi*, pp. 115–123, World Scientific, 2010.
- [45] U. D. Protocol, "Rfc 768 j. postel isi 28 august 1980," *Isi*, 1980.
- [46] L. Gautier and C. Diot, "Design and evaluation of mimaze a multi-player game on the internet," in *Proceedings. IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems (Cat. No. 98TB100241)*, pp. 233–236, IEEE, 1998.
- [47] P. Emmerich, D. Raumer, F. Wohlfart, and G. Carle, "A study of network stack latency for game servers," in *2014 13th Annual Workshop on Network and Systems Support for Games*, pp. 1–6, IEEE, 2014.

- [48] S. Garg and M. Kappes, “An experimental study of throughput for udp and voip traffic in ieee 802.11 b networks,” in *2003 IEEE Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003.*, vol. 3, pp. 1748–1753, IEEE, 2003.
- [49] T. Sinam, I. T. Singh, P. Lamabam, N. N. Devi, and S. Nandi, “A technique for classification of voip flows in udp media streams using voip signalling traffic,” in *2014 IEEE International Advance Computing Conference (IACC)*, pp. 354–359, IEEE, 2014.
- [50] Y. Tsuchiya, M. Inaba, M. Matsumoto, H. Sekiya, S. Sakata, and K. Yagyu, “Analysis of maximum udp throughput of short-hop string networks for voip applications,” in *Proc. WPMC*, Citeseer, 2009.
- [51] I. Coonjah, P. C. Catherine, and K. Soyjaudah, “Design and implementation of udp tunneling-based on openssh vpn,” in *2018 International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)*, pp. 640–645, IEEE, 2018.
- [52] L. Eggert and G. Fairhurst, “Unicast udp usage guidelines for application designers,” *Internet society*, 2008.
- [53] H. Hamdoun, S. Nazir, J. A. Alzubi, P. Laskot, and O. A. Alzubi, “Performance benefits of network coding for hevc video communications in satellite networks,” *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 17, no. 3, pp. 1956–1956, 2021.
- [54] J. Deutschmann, K.-S. Hielscher, and R. German, “Satellite internet performance measurements,” in *2019 International Conference on Networked Systems (NetSys)*, pp. 1–4, IEEE, 2019.
- [55] I. Bisio and M. Marchese, “Performance evaluation of bandwidth allocation methods in a geostationary satellite channel in the presence of internet traffic,” *Computer Networks*, vol. 52, no. 1, pp. 275–291, 2008.
- [56] U. Speidel and L. Qian, “Rethinking tcp and udp on shared satellite links,” in *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–5, IEEE, 2019.

- [57] A. H. Wheeb, “Performance evaluation of udp, dccp, sctp and tfrc for different traffic flow in wired networks,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 7, no. 6, p. 3552, 2017.
- [58] Y. Firmansyah, N. Rahayu, Y. Prabowo, I. N. Y. Putro, and F. Kurniawan, “Quality of service (qos) analysis for real-time telemetry by ip satellite communication,” in *2020 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, pp. 18–21, IEEE, 2020.
- [59] W. Stanislaus, G. Fairhurst, and J. Radzik, “Cross layer techniques for flexible transport protocol using udp-lite over a satellite network,” in *2005 2nd International Symposium on Wireless Communication Systems*, pp. 706–710, IEEE, 2005.
- [60] A. Annese, P. Barsocchi, N. Celandroni, and E. Ferro, “Performance evaluation of udp multimedia traffic flows in satellite-wlan integrated paths,” in *Proceedings of the 11th Ka and Broadband Communications Conference*, pp. 267–275, 2005.
- [61] “Transmission Control Protocol.” RFC 793, Sept. 1981.
- [62] K. Fall and S. Floyd, “Simulation-based comparisons of tahoe, reno and sack tcp,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 26, no. 3, pp. 5–21, 1996.
- [63] A. Gurtov, T. Henderson, S. Floyd, and Y. Nishida, “The NewReno Modification to TCP’s Fast Recovery Algorithm.” RFC 6582, Apr. 2012.
- [64] B. Edu, “A Comparative Analysis of TCP Tahoe, Reno, New-Reno, SACK and Vegas.” <https://inst.eecs.berkeley.edu/~ee122/fa05/projects/Project2/SACKRENEVEGAS.pdf>, 2005. [Online; accessed 30-July-2021].
- [65] D. Bisen, D. Sharma, *et al.*, “Improve performance of tcp new reno over mobile ad-hoc network using abra,” *arXiv preprint arXiv:1105.0251*, 2011.
- [66] M. Luglio, M. Y. Sanadidi, M. Gerla, and J. Stepanek, “On-board satellite” split tcp” proxy,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, no. 2, pp. 362–370, 2004.

- [67] F. Peng, Á. S. Cardona, K. Shafiee, and V. C. Leung, "Tcp performance evaluation over geo and leo satellite links between performance enhancement proxies," in *2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, pp. 1–5, IEEE, 2012.
- [68] N. Parvez, A. Mahanti, and C. Williamson, "An analytic throughput model for tcp newreno," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 18, no. 2, pp. 448–461, 2009.
- [69] J. Liu, Z. Han, and W. Li, "Performance analysis of tcp new reno over satellite dvb-rcs2 random access links," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 1, pp. 435–446, 2019.
- [70] S. Mascolo, C. Casetti, M. Gerla, M. Y. Sanadidi, and R. Wang, "Tcp westwood: Bandwidth estimation for enhanced transport over wireless links," in *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 287–297, 2001.
- [71] S. Mascolo, L. A. Grieco, R. Ferorelli, P. Camarda, and G. Piscitelli, "Performance evaluation of westwood+ tcp congestion control," *Performance Evaluation*, vol. 55, no. 1-2, pp. 93–111, 2004.
- [72] S. Utsumi, S. M. S. Zabir, Y. Usuki, S. Takeda, N. Shiratori, Y. Kato, and J. Kim, "A new analytical model of tcp hybla for satellite ip networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 124, pp. 137–147, 2018.
- [73] M. Bacco, M. Colucci, and A. Gotta, "Application protocols enabling internet of remote things via random access satellite channels," in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–6, IEEE, 2017.
- [74] S. K. Routray, R. Tengshe, A. Javali, S. Sarkar, L. Sharma, and A. D. Ghosh, "Satellite based iot for mission critical applications," in *2019 International Conference on Data Science and Communication (IconDSC)*, pp. 1–6, IEEE, 2019.
- [75] OMNET++, "OMNET++ Discrete Event Simulator." <https://omnetpp.org/>, 2021. [Online; accessed 30-Sep-2021].

- [76] INET, “INET Framework.” <https://inet.omnetpp.org/>, 2021. [Online; accessed 30-Sep-2021].
- [77] R. Jain, A. Duresi, and G. Babic, “Throughput fairness index: An explanation,” in *ATM Forum contribution*, vol. 99, 1999.
- [78] A. Freimann, M. Dierkes, T. Petermann, C. Liman, F. Kempf, and K. Schilling, “Estnet: a discrete event simulator for space-terrestrial networks,” *CEAS Space Journal*, vol. 13, pp. 39–49, 2021.

Παραρτήματα

Γλωσσάρι Ξενικών Όρων

Delay	Καθυστέρηση
Atmospheric	Ατμοσφαιρική έλξη
Drag	
Light and Thermal radiation	Φως και θερμική ακτινοβολία
Gravitational radiation	Βαρυτική ακτινοβολία
Electromagnetic Drag	Ηλεκτρομαγνητική έλξη
Tidal effect	Παλιρροϊκό φαινόμενο
Satellite Constellation	Δορυφορικός Σχηματισμός
Roscosmos	Ρωσική Διαστημική Υπηρεσία
Orbital elements	Τροχιακά στοιχεία
Inclination	Έγκλιση
Ascending Node	Ανοδικός Κόμβος
Deviation	Απόκλιση
Argument of Perigee	Το Όρισμα του Περιγείου
True Anomaly	Αληθής ανωμαλία
Slant Range	Εμβέλεια Κλίσης

Elevation Angle	Η γωνιά ανύψωσης
Orbital Planes	Τροχιακά επίπεδα
Interface	Διεπαφή
Datagram	IP πακέτα
Header	Κεφαλίδα
Fragmentation	Κατακερματισμός
Routers	Δρομολογητές

Συμβολισμοί Μεγεθών

E	Το σύνολο των ζεύξεων
$\mathbf{A}$	Διάνυσμα
$\hat{u}_A$	Μοναδιαίο διάνυσμα
$\mathbf{r}(t)$	Διάνυσμα θέσης
$\mathbf{v}(t)$	Διάνυσμα ταχύτητας
$\mathbf{a}(t)$	Διάνυσμα επιτάχυνσης
e	Εκκεντρικότητα
a	Μεγάλος Άξονας
b	Μικρός Άξονας
c	Η απόσταση της εστίας από την αρχή των αξόνων
i	Η γωνιά της Έγκλισης
Ω	Η γωνία Ορθής Άνοδους του Ανοδικού Κόμβου
ω	Η γωνία του Περιγείου
v	Η γωνιά της Αληθής ανωμαλίας
D	Η απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και του επίγειου σταθμού

El	Η γωνία ανύψωσης
a	Η κεντρική γωνία κάλυψης
R	Η περίμετρος της Γης
H	Η απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και της επιφάνειας της θάλασσας
ρ	Ρυθμός κωδικοποίησης
$cwnd$	Παράθυρο συμφόρησης
$ssthresh$	Το όριο του μεγέθους του Slow Start

Συντομογραφίες

DBS	Direct Broadcasting by Satellite
DTH	Direct to Home
DVB-S	Digital Video Broadcasting by Satellite
ETSI	European Telecommunication Standard Institute
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
LEO	Low Earth Orbit
MEO	Medium Earth Orbit
HEO	High Elliptical Orbit
GEO	Geosynchronous Equatorial Orbit
ISS	International Space Station
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ESA	European Space Agency

CSA	Canadian Space Agency
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
GPS	Global Positioning System
M2M	Machine to Machine
OSI	Open Systems Interconnection
MAC	Medium Access Control
FTP	File Transfer Protocol
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol
FAMA	Fixed Assignment Multiple Access
ISL	Inter-satellite links
FDM	Frequency Division Multiplexing
TDM	Time Division Multiplexing
PSK	Phase Shift Keying
FSK	Frequency Shift Keying
MPSK	M-ary Phase Shift Keying
FEC	Forward Error Correction
IP	Internet Protocol

ICMP	Internet Control Message Protocol
TTL	Time to live
RFC	Request for Comments
IETF	Internet Engineering Task Force
ACK	Acknowledgment number
MMS	Max Segment Size
cwnd	congestion window
RTT	Round-Trip Time
SACK	Selective Acknowledgment
CoAP	Constrained Application Protocol
MQTT	Message Queue Telemetry Transport
QoS	Quality of Service
IoT	Internt of Things
SAT-IoT	Satellite IoT

Ευρετήριο

- Bandwith Delay Product, 48
- Code Channel, 31
- Congestion avoidance, 49
- Constrained Application Protocol, 55
- DVB-S, 2
- Eccentricity, 15
- Fast Recovery, 50
- Fast Retransmit, 50
- Formating Processing, 28
- GEO, 10
- GPS, 10
- HEO, 10
- IETF, 36
- IP, 33
- ISL, 27
- Jain fairness index, 64
- LEO, 8
- MEO, 10
- Message Queue Telemetry Transport, 55
- Modulation, 30
- OSI Layers, 22
- Orbital Elements, 16
- RFC, 36
- Retransmission, 47
- Satellite Constellation, 20
- Satellite Footprint, 18
- Satellite IoT, 56
- Sliding Window, 45
- Slow Start, 46
- TCP Hybla, 54
- TCP New Reno, 51
- TCP Westwood, 52
- TTL, 34
- Transmission Control Protocol, 39
- Tundra Orbit, 10
- User Datagram Protocol, 36