

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Analisi delle prestazioni del protocollo TCP in un canale ad alta latenza tramite simulazioni ns-3

LAUREANDO

Nicola Stocco

Matricola 2000255

RELATORE

Prof. Marco Giordani

Università degli Studi di Padova

CORRELATORE

Matteo Pagin

Università degli Studi di Padova

ANNO ACCADEMICO: 2022-2023

DATA DI LAUREA: 18/07/2023

*Ai miei genitori
che hanno sempre creduto in me.*

Abstract

Lo sviluppo di reti cellulari di sesta generazione (6G) sta portando la comunità scientifica a valutare le prestazioni di comuni protocolli di rete in ambienti di comunicazione non terrestre. Di particolare interesse è la possibilità di utilizzare satelliti a varie orbite come nodi in grado di fornire connettività ad Internet in zone remote o rurali, o in assenza di infrastrutture di rete tradizionali.

Lo scopo di questa tesi è quello di analizzare le prestazioni delle implementazioni più comuni del protocollo TCP in un canale ad alta latenza, e quindi particolarmente rappresentativo di una comunicazione Terra-satellite, attraverso l'uso del simulatore di rete ns-3. Questo studio ha permesso di valutare come le prestazioni del protocollo TCP siano influenzate da diversi parametri, tra cui l'altitudine del satellite e la conseguente latenza nella comunicazione, le caratteristiche del canale come la frequenza e la banda di comunicazione, e la configurazione dei nodi in termini di potenza di trasmissione ed il loro guadagno d'antenna.

Indice

| | |
|---|-------------|
| Elenco delle figure | ix |
| Elenco delle tabelle | xi |
| Lista degli acronimi | xiii |
| 1 Introduzione | 1 |
| 2 Stato dell'Arte | 3 |
| 2.1 Non-Terrestrial Networks | 3 |
| 2.1.1 Piattaforme non terrestri | 3 |
| 2.1.2 Scenari di utilizzo | 5 |
| 2.2 Protocollo TCP | 6 |
| 2.2.1 Algoritmi di controllo di congestione | 8 |
| 3 Simulatore | 11 |
| 3.1 ns-3 | 11 |
| 3.2 Modellazione del canale NTN | 12 |
| 3.2.1 Scenari | 14 |
| 3.3 Implementazione del simulatore | 15 |
| 3.3.1 Parametri di ingresso | 16 |
| 4 Analisi | 19 |
| 4.1 Metodologia | 19 |
| 4.2 Condizione NLOS | 19 |
| 4.3 Analisi temporale | 20 |
| 4.4 Analisi satelliti GEO | 22 |
| 4.5 Analisi satelliti LEO | 24 |
| 4.5.1 Impatto della distanza del satellite | 24 |

INDICE

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.5.2 | Impatto dell'angolo di elevazione del satellite | 28 |
| 4.5.3 | Impatto del rate dell'applicazione | 32 |
| 5 | Conclusione | 35 |
| | Bibliografia | 39 |

Elenco delle figure

| | | |
|------|---|----|
| 4.1 | Confronto condizioni di visibilità con distanza del satellite da Terra di 200 km, elevazione di 90°, e scenario rurale | 20 |
| 4.2 | Throughput in funzione del tempo. Il rate dell'applicazione è di 30 Mbps, e la capacità del canale è assunta arbitrariamente alta. | 21 |
| 4.3 | Variazione della finestra di congestione in funzione del tempo. Il rate dell'applicazione è di 30 Mbps, e la capacità di canale è assunta arbitrariamente alta | 21 |
| 4.4 | Effetti implementazioni TCP per satelliti GEO, con rate dell'applicazione di 30 Mbps e elevazione di 90° | 23 |
| 4.5 | SNR medio al variare della distanza per bande Ka e S | 25 |
| 4.6 | Probabilità d'errore sul pacchetto al variare della distanza per bande Ka e S con diverse soglie di SNR β | 25 |
| 4.7 | Throughput al variare della distanza per bande Ka e S, con rate dell'applicazione di 30 Mbps, elevazione di 90° e soglia rapporto segnale-rumore (SNR) di 0 dB | 26 |
| 4.8 | Throughput banda S al variare delle implementazioni TCP, assumendo rate dell'applicazione di 30 Mbps, elevazione di 90° e soglia SNR di 0 dB | 28 |
| 4.9 | SNR al variare dell'angolo di elevazione per bande Ka e S | 29 |
| 4.10 | Throughput al variare dell'angolo di elevazione per bande Ka e S, con rate dell'applicazione di 30 Mbps, distanza del satellite dalla Terra di 200 km e soglia SNR a 0 dB | 30 |
| 4.11 | Latenza al variare dell'angolo di elevazione e algoritmo di controllo di congestione per banda S, assunto rate dell'applicazione di 30 Mbps, distanza del satellite dalla Terra di 200 km e soglia SNR a 0 dB | 31 |

ELENCO DELLE FIGURE

| | | |
|------|--|----|
| 4.12 | Throughput al variare dell'angolo di elevazione e algoritmo di controllo di congestione per banda Ka, con rate dell'applicazione di 30 Mbps, distanza del satellite dalla Terra di 200 km e soglia SNR pari a 0 dB | 32 |
| 4.13 | Throughput al variare dell'angolo di elevazione per banda Ka e S, con rate dell'applicazione pari alla capacità, distanza di 200 km e soglia SNR di 0 dB | 34 |

Elenco delle tabelle

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Attenuazione atmosferica per diversi angoli di elevazioni e frequenze portanti [3]. | 13 |
| 3.2 | Probabilità di essere in linea di vista col satellite | 14 |
| 3.3 | <i>SF</i> e <i>CL</i> per scenario urbano denso. | 14 |
| 3.4 | <i>SF</i> e <i>CL</i> per scenario urbano. | 15 |
| 3.5 | <i>SF</i> e <i>CL</i> per scenario suburbano e rurale. | 15 |
| 3.6 | Parametri per bande S e Ka. | 17 |
| 4.1 | Capacità canale per bande Ka e S per satelliti a distanza di 200 km | 33 |

Lista degli acronimi

| | |
|--------------|------------------------------------|
| NTN | Non-Terrestrial Network |
| TCP | Transmission Control Protocol |
| UAV | Unmanned Aerial Vehicle |
| HAPS | High-Altitude Platform System |
| 3GPP | 3rd Generation Partnership Project |
| LEO | Low Earth Orbit |
| MEO | Medium Earth Orbit |
| GEO | Geostationary Orbit |
| ACK | Acknowledgment |
| SN | Numero di Sequenza |
| swnd | finestra di trasmissione |
| rwnd | finestra di ricezione |
| cwnd | finestra di congestione |
| MSS | Maximum Segment Size |
| RTT | Round Trip Time |
| ssthr | Slow Start Threshold |
| BDP | Bandwidth-Delay Product |
| LOS | Line Of Sight |

ELENCO DELLE TABELLE

NLOS Non-Line Of Sight

SNR rapporto segnale-rumore

RTO Retransmission Timeout



Introduzione

In parallelo alla rapida evoluzione e conseguente implementazione delle reti cellulari di quinta generazione (5G), la comunità scientifica si sta focalizzando su nuove frontiere dell'interconnettività per lo sviluppo di connessioni mobili di sesta generazione (6G) [8].

Di particolare interesse è il concetto di Non-Terrestrial Networks (NTNs), ovvero l'insieme di reti di comunicazione operanti al di sopra della superficie terrestre, dove l'accesso alla rete viene fornito da droni, piattaforme ad elevata altitudine come palloni aerostatici, e satelliti orbitanti a varie distanze dalla Terra [10]. Le reti non terrestri offrono numerose opportunità per aumentare le prestazioni delle reti cellulari moderne. In particolare, le NTN offrono la possibilità di garantire ubiquità di servizio in aree geografiche remote, in cui l'uso di installazioni terrestri risulta svantaggioso sia dal punto di vista logistico che economico [4], e continuità di servizio, per esempio in aree colpite da disastri naturali [20]. Inoltre, nodi non terrestri forniranno punti di accesso aggiuntivi nel caso di sovraccarico dell'infrastruttura terrestre. Di conseguenza, le reti cellulari di sesta generazione implementeranno un'architettura tridimensionale eterogenea, dove i nodi NTN andranno a complementare le attuali stazioni base terrestri [19].

Visti gli elevati costi di lancio di nodi non terrestri, lo sviluppo di queste tecnologie richiede un preliminare studio, attraverso simulazioni, di come le attuali implementazioni dei protocolli di comunicazione Internet rispondano alle caratteristiche di questo nuovo ambiente.

Questo elaborato ha lo scopo di analizzare tramite simulazione come vari parametri vadano ad alterare le prestazioni di comunicazioni satellite-Terra, prestando particolare attenzione a come le attuali implementazioni del protocollo Transmission Control Protocol (TCP) rispondano ad un canale ad alta latenza e con elevato rumore, tipico di comunicazioni satellitari.

In particolare, la disamina di questi argomenti si svilupperà nei seguenti capitoli:

- Capitolo 2: trattazione di argomenti fondamentali per la comprensione dell'elaborato e introduzione alle NTN;
- Capitolo 3: presentazione del simulatore sviluppato, modellazione del canale, topologia della rete e parametri importanti per le successive analisi;
- Capitolo 4: analisi delle performance; e
- Capitolo 5: conclusione e possibili studi futuri.

2

Stato dell'Arte

Questo capitolo introduce concetti chiave per la comprensione degli argomenti trattati nel resto dell'elaborato, soffermandosi in particolare sulla descrizione delle NTN e sulle principali implementazioni TCP.

2.1 NON-TERRESTRIAL NETWORKS

Con NTN si intende una qualunque rete wireless contenente elementi non terrestri come droni, aerostati e satelliti. Questa nuova tipologia di reti è riconosciuta a livello internazionale come una delle tecnologie più promettenti per lo sviluppo del settore delle telecomunicazioni dei prossimi anni. Questo interesse è condiviso anche dal 3rd Generation Partnership Project (3GPP), che recentemente ha prodotto relazioni [12] riguardanti la standardizzazione dell'utilizzo di nodi non terrestri nelle reti cellulari.

2.1.1 PIATTAFORME NON TERRESTRI

UAV

Gli Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), comunemente conosciuti come droni, sono velivoli di dimensioni ridotte operanti senza pilota. Permettono di fornire una connessione a banda larga ad un'area ristretta e per un periodo di tempo limitato. Infatti, i droni volano ad altitudini che non superano le poche centinaia di metri, coprendo singolarmente piccole porzioni di territorio, ma subendo

2.1. NON-TERRESTRIAL NETWORKS

una minore attenuazione del segnale e minori ritardi di propagazione rispetto a tecnologie operanti ad altitudini maggiori. Un altro vantaggio degli UAVs è il loro basso costo, che ne rende possibile una rapida messa in servizio.

Tuttavia, i droni richiedono un grande consumo di energia per rimanere in volo e quindi operativi. Allo stesso momento, sono comunemente equipaggiati con batterie di capacità ridotta per contenerne il peso. Queste caratteristiche causano una autonomia particolarmente limitata nel tempo [7].

HAPS

Viene definita High-Altitude Platform System (HAPS) una stazione radio ad un'altezza compresa tra i 20 e i 50 km in un punto specifico, nominale e fisso rispetto alla Terra [16]. Rientrano in questa definizione mezzi come aerostati, aerei solari o UAVs ad elevata autonomia. Questa tipologia di nodi, grazie alla loro distanza dalla superficie terrestre, riescono a fornire connettività ad ampie aree geografiche, mantenendo i costi di dislocamento relativamente contenuti e garantendo continuità di servizio per diverse settimane. Tra le problematiche delle HAPSs vi è la necessità di rifornimento e la complessità di mantenersi stabili in aria [11].

SATELLITI

Un satellite artificiale è un oggetto creato dall'uomo e posto in orbita intorno a un corpo celeste, come la Terra. Questi nodi vengono lanciati nello spazio utilizzando veicoli di lancio, come i razzi, e sono posizionati in orbite specifiche per garantire il corretto funzionamento delle loro missioni.

In particolare, i satelliti si distinguono nelle seguenti categorie:

Low Earth Orbit (LEO) - si trovano ad un'altitudine compresa tra i 200 ed i 2.000 km, avendo un livello di attenuazione del segnale e ritardo di propagazione bassi rispetto alle altre categorie. Tuttavia, la relativa vicinanza alla superficie terrestre implica una ridotta area di servizio ed un periodo di rivoluzione terrestre di 90 minuti. Questi ultimi rendono necessaria la presenza di una costellazione di satelliti LEO, e di un meccanismo che ristabilisca la connessione ad un nuovo satellite nell'eventualità di perdita di quest'ultima. Di conseguenza, garantire continuità di servizio risulta complesso e può richiedere un numero significativo di satelliti.

Il costo di messa in opera di questi satelliti è inferiore rispetto a satelliti che orbitano ad altezze maggiori, a discapito della loro relativamente breve vita operativa di pochi anni [18].

Geostationary Orbit (GEO) - mantengono un'orbita a 35.863 km di altezza lungo l'equatore, con un periodo uguale a quello della rotazione terrestre, in modo da avere sempre la stessa posizione relativa rispetto alla superficie terrestre. Questo permette loro di servire un'ampia regione geografica, garantendo la continua presenza della medesima stazione satellitare in una data area. Le problematiche principali di questa tipologia di satelliti sono la marcata attenuazione del segnale e l'elevato ritardo di propagazione, oltre ad onerosi costi di lancio dei satelliti stessi.

Medium Earth Orbit (MEO) - hanno un'orbita compresa tra i 2.000 e i 35.786 km e proprietà intermedie tra i satelliti LEO e GEO.

2.1.2 SCENARI DI UTILIZZO

Lo scopo principale dell'utilizzo di reti non terrestri è quello di integrare le attuali infrastrutture terrestri, potenziandole ove presenti, e rendendo possibile l'accesso all'Internet anche in condizioni altrimenti impraticabili.

Nello specifico, una integrazione delle NTN nelle reti cellulari può portare ai seguenti benefici:

- **Continuità di servizio:** stazioni aeree possono garantire connettività anche quando le stazioni terrestri non sono disponibili, per esempio in caso di guasto o disastri naturali.
- **Ubiquità di servizio:** l'utilizzo di nodi NTN permette di assicurare connessione anche in aree geografiche remote non raggiungibili dalle infrastrutture terrestri.
- **Bilancio di carico:** nell'eventualità in cui vi sia la creazione di un hot spot che sovraccarichi la rete convenzionale, parte del carico può essere gestito dalla rete non terrestre.

2.2. PROTOCOLLO TCP

- Riduzione hop nelle connessioni di rete: quando una connessione richiederebbe di attraversare un numero elevato di nodi terrestri, diventa preferibile sfruttare nodi satellitari riducendo il numero di hop¹ complessivi [7].
- Supporto per la mobilità ad alte velocità: le peculiarità delle reti non terrestri permetterebbero di garantire connessione Internet anche a mezzi in movimento rapido senza la necessità di frequenti *handovers*²

2.2 PROTOCOLLO TCP

Il livello 4 dello standard ISO/OSI³ fornisce una connessione logica diretta tra due entità di una rete, occupandosi di connettere direttamente i loro processi [5].

I servizi comuni a tutti i protocolli di livello 4 sono:

- Comunicazione processo-processo;
- Indirizzamento;
- Multiplazione; ed
- Incapsulamento.

Nello specifico, il protocollo considerato in questo elaborato è TCP, che fornisce servizi di affidabilità attraverso il controllo d'errore, controllo di flusso e controllo di congestione.

CONTROLLO D'ERRORE

TCP include meccanismi per rilevare e ritrasmettere segmenti corrotti, ritrasmettere segmenti persi, memorizzare segmenti fuori sequenza fino all'arrivo dei segmenti mancanti e rilevare e scartare segmenti duplicati. Per riconoscere quali segmenti ritrasmettere, ognuno di essi viene identificato univocamente da un Numero di Sequenza (SN) nell'header⁴.

¹Ogni dispositivo di rete attraverso il quale il pacchetto deve passare per raggiungere la sua destinazione viene considerato un "hop".

²Processo di trasferimento di una connessione o di un servizio da un punto di accesso a un altro, senza interrompere la comunicazione o la sessione in corso.

³International Organization for Standardization/Open Systems Interconnection

⁴L'header è la parte di un pacchetto che contiene informazioni di controllo necessarie al funzionamento della rete.

Il controllo degli errori viene realizzato utilizzando tre strumenti: il checksum, l'acknowledgment ed il timeout.

1. Checksum: TCP utilizza un valore di checksum per rilevare eventuali errori di trasmissione che possono aver compromesso l'integrità dei segmenti. Il checksum calcolato dal trasmettitore viene confrontato con il checksum calcolato dal destinatario per garantire che i segmenti siano stati trasmessi correttamente.
2. Acknowledgment (ACK): Dopo aver ricevuto un segmento, il ricevitore invia un acknowledgment al trasmettitore per confermare che il segmento sia stato ricevuto correttamente indicando il SN del prossimo segmento atteso.
3. Timeout: Se il trasmettitore non riceve un ACK entro un determinato periodo di tempo, viene assunto che il segmento sia stato perso o corrotto durante la trasmissione. In questo caso, il trasmettitore ritrasmette il segmento per garantirne la corretta consegna.

CONTROLLO DI FLUSSO

Il controllo di flusso è un meccanismo che regola l'invio di segmenti, per evitare che il ricevitore venga sovraccaricato nell'eventualità in cui l'applicazione (o, in generale, i livelli superiori) non riesca(no) a consumare abbastanza velocemente tali pacchetti. A tal scopo, TCP utilizza un sistema a finestre: il ricevitore mantiene una finestra di ricezione (rwnd), che indica il numero di segmenti che possono essere ricevuti prima di terminare lo spazio nel buffer, mentre il trasmettitore mantiene una finestra di trasmissione (swnd), che indica il numero massimo di pacchetti che possono essere inviati prima di ricevere ACK. La dimensione della swnd non può mai superare quella della rwnd, così garantendo il controllo di flusso.

CONTROLLO DI CONGESTIONE

Mentre il controllo di flusso si occupa di evitare il sovraccarico del ricevitore, il controllo di congestione evita di sovraccaricare la rete che deve essere attraversata dai pacchetti per raggiungere la loro destinazione. Questo meccanismo utilizza una ulteriore finestra mobile chiamata finestra di congestione (cwnd),

2.2. PROTOCOLLO TCP

la cui dimensione dipende dallo stato della rete. Questa finestra limita a sua volta la $swnd$, che dunque equivarrà alla minore tra la finestra di ricezione e la finestra di congestione:

$$swnd = \min\{rwnd, cwnd\}. \quad (2.1)$$

La dimensione della $cwnd$ viene tenuta aggiornata in base alle informazioni ottenute dal trasmettitore sullo stato della rete. In particolare, si distinguono tre fasi:

1. **Slow Start:** la $cwnd$ parte da un valore iniziale, che ne rappresenta il minimo, per poi crescere esponenzialmente. Ad ogni corretta ricezione di un ACK la finestra cresce di 1 Maximum Segment Size (MSS)⁵, ed andando quindi a raddoppiare ad ogni Round Trip Time (RTT)⁶. Raggiunto un valore di soglia chiamato Slow Start Threshold ($ssth$), si entra nella fase successiva.
2. **Congestion Avoidance:** la crescita della finestra di congestione assume un andamento conservativo, incrementando di 1 MSS ogni RTT.
3. **Fast Recovery:** a seguito dell'arrivo di tre ACKs duplicati, TCP rileva un evento di congestione lieve e attua delle misure per ritrasmettere i pacchetti persi senza ridurre eccessivamente l'invio di pacchetti.

2.2.1 ALGORITMI DI CONTROLLO DI CONGESTIONE

Le caratteristiche specifiche delle sopracitate fasi dipendono dalle implementazioni del protocollo. Nel resto di questa sezione vengono presentate le peculiarità degli algoritmi di controllo di congestione più comuni, e che verranno utilizzati e confrontati nelle simulazioni del Capitolo 4.

NEWRENO

NewReno è un'evoluzione dell'algoritmo TCP Reno. In questo caso, la rilevazione di eventi di congestione si basa interamente sulla rilevazione di pacchetti

⁵Massima dimensione in byte di un segmento che può essere inviata dal protocollo TCP

⁶"Tempo di andata e ritorno", ovvero il tempo che intercorre tra la trasmissione di un pacchetto e la ricezione del suo relativo ACK.

persi: allo scadere del time out di ritrasmissione viene rilevato un evento di congestione grave e dunque la cwnd viene bruscamente ridotta ad un valore basso, solitamente di 1 MSS, per iniziare una nuova fase di Slow Start.

Con la ricezione di tre ACKs duplicati viene rilevato un evento di congestione lieve, entrando nella fase di Fast Recovery. Successivamente, entrambi lo ssth e la cwnd vengono settati uguali alla metà della cwnd precedente. Infine, il trasmettitore inizia a ritrasmettere i pacchetti persi. Finché si riceveranno ACK duplicati, la cwnd crescerà di 1 MSS. Una volta ricevuto un ACK non duplicato la cwnd viene impostata pari a ssth e l'algoritmo entra nella fase di Congestion Avoidance [9].

CUBIC

Implementazioni come NewReno risultano poco efficienti su canali con capacità e Bandwidth-Delay Product (BDP)⁷ elevati [15], caratteristiche tipiche di comunicazioni satellitari.

CUBIC nasce con lo scopo di risolvere tale inefficacia. Per fare ciò, prevede un aumento della cwnd secondo una funzione cubica durante la fase di Congestion Avoidance. Di conseguenza, la cwnd cresce rapidamente, fino a raggiungere un valore vicino al suo massimo stimato e corrispondente al punto di flesso della funzione. Superato tale punto, la funzione cubica torna a crescere rapidamente, permettendo di sondare celermente il canale e di valutarne l'effettiva condizione di congestione [17].

WESTWOOD

Westwood è stato inventato per migliorare le performance di TCP in condizione di connessioni wireless prone ad errore. Westwood applica un algoritmo basato sulla capacità, ovvero stima ripetutamente la capacità offerta dal canale monitorando la frequenza di ricezione degli ACKs. Questo permette di scegliere più accuratamente i valori di cwnd e ssth a seguito di eventi di congestione.

In particolare, Westwood si basa sulla seguente ipotesi: se una rete raggiunge un dato rateo di trasmissione, la finestra che equivale a tale rateo è supportata dalla rete e non ne provoca congestione. Dunque, a differenza delle precedenti

⁷Prodotto tra capacità di canale e RTT. Corrisponde al numero di "pacchetti" necessari a riempire completamente il canale.

2.2. PROTOCOLLO TCP

implementazioni, in caso di congestione lieve la *cwnd* non viene arbitrariamente dimezzata, ma viene attuata una decisione basata sulla stima della capacità della rete [6].

VEGAS

Uno dei problemi principali del considerare solamente la perdita dei pacchetti per stimare le condizioni di una rete è l'impossibilità di avere un controllo preventivo della congestione. A differenza delle implementazioni precedenti, Vegas usa come metrica per valutare lo stato della rete il RTT. Questo permette al trasmettitore di valutare se i pacchetti inviati siano memorizzati nei buffer di trasmissione invece che essere subito inoltrati, rilevando dunque un principio di congestione ed adattando il rateo di trasmissione di conseguenza. In particolare, TCP Vegas assume che il canale sia sottoutilizzato se il RTT attuale è vicino al minimo registrato, mentre viene rilevata della congestione quando tale valore supera una determinata soglia [15].

3

Simulatore

Per realizzare gli studi di questo elaborato è stato sviluppato un apposito simulatore basato su ns-3, al quale sono state apportate svariate modifiche per modellare correttamente il canale interessato e produrre in output le metriche fondamentali per la valutazione di una comunicazione TCP. Nel seguente capitolo viene introdotto il simulatore ns-3 e la metodologia con cui è stato esteso tale simulatore per modellare il canale NTN.

3.1 NS-3

ns-3 è un simulatore di rete ad eventi discreti per i sistemi Internet, principalmente rivolto alla ricerca ed all'uso educativo. ns-3 è un software gratuito e open source, con licenza GNU GPLv2, e mantenuto da una comunità globale. Nel mondo della ricerca sono stati prodotti numerosi studi basati su ns-3, contando nell'ordine delle migliaia il numero di pubblicazioni scientifiche in cui è citato il simulatore [14].

ns-3 offre una vasta gamma di funzionalità e modelli di simulazione che consentono di esplorare diversi aspetti delle reti, come protocolli di routing, algoritmi di accesso al mezzo, gestione del traffico e modelli di interferenza wireless. Il simulatore è stato progettato con l'intento di consentire personalizzazione e flessibilità estese, in modo da permettere agli utenti di adattarlo alle proprie esigenze.

Una delle caratteristiche distintive di ns-3 è l'attenzione posta nel modellare accuratamente dispositivi di rete e relativi protocolli, garantendo un'ottima attendibilità dei risultati da esso prodotti. Proprio per questo, ns-3 è stato utilizzato per ideare e testare alcuni protocolli di rete usati in questo elaborato, per esempio TCP NewReno e TCP Westwood.

3.2 MODELLAZIONE DEL CANALE NTN

La modellazione del canale fra due estremi di comunicazione, di cui almeno uno non terrestre, si basa su [18], dove gli effetti aggiuntivi dovuti all'atmosfera sono stati semplificati con un unico parametro dipendente dalla frequenza portante del segnale e dall'elevazione del satellite.

Un canale satellitare introduce effetti di propagazione aggiuntivi rispetto alle controparti terrestri, soprattutto riguardo l'attenuazione del segnale ed il ritardo di propagazione. L'attenuazione del segnale in dB è stata modellata usando la formula [1]

$$PL = FSPL(d, f_c) + SF + CL(\alpha, f_c) + AL, \quad (3.1)$$

dove $FSPL(d, f_c)$ rappresenta la perdita di potenza del segnale ideale nello spazio vuoto. Questo dipende dalla distanza d in chilometri tra i due punti e dalla frequenza portante f_c in MHz. Il secondo termine è lo shadowing, che rappresenta l'attenuazione del segnale dovuto ad ostacoli fisici presenti nell'ambiente di propagazione. Quest'ultimo viene modellato come

$$SF \sim N(0, \sigma_{SF}^2), \quad (3.2)$$

ovvero una variabile aleatoria gaussiana con media nulla e varianza σ_{SF}^2 , il cui valore dipende dallo specifico scenario di simulazione. CL rappresenta il clutter loss, ovvero un'attenuazione dovuta ad oggetti in cui si riflette o diffonde il segnale. Esso dipende da: condizione di visibilità, angolo di elevazione del satellite α^1 e frequenza portante. Con le unità di misura citate, 3.1 può essere

¹L'angolo di elevazione è l'angolo formato tra il satellite e l'orizzonte. A 10° il satellite si trova appena sopra l'orizzonte mentre a 90° il satellite è perpendicolarmente sopra il ricevitore.

riformulata in

$$FSPL(d, f_c) = 32.45 + 20 \log_{10}(f_c) + 20 \log_{10}(d). \quad (3.3)$$

Infine, l'ultimo termine rappresenta un'addizionale attenuazione dovuta ad effetti atmosferici quali scintillazione e assorbimento atmosferico. Quest'ultimo dipende dall'elevazione del satellite e frequenza portante, come riportato in Tab. 3.1.

| Angolo di elevazione | AL (dB) | |
|----------------------|----------|---------|
| | Ka-Bands | S-Bands |
| 10° | 7 | 0 |
| 20° | 4 | 0 |
| 30° | 3 | 0 |
| 40° | 2.5 | 0 |
| 50° | 2.4 | 0 |
| 60° | 2.3 | 0 |
| 70° | 2.2 | 0 |
| 80° | 2.1 | 0 |
| 90° | 2 | 0 |

Tabella 3.1: Attenuazione atmosferica per diversi angoli di elevazioni e frequenze portanti [3].

Una volta calcolata l'attenuazione, l' SNR (lineare) al ricevitore viene stimato come

$$SNR = \frac{P_{Tx} \cdot G_a \cdot g}{N_0 \cdot B}, \quad (3.4)$$

dove P_{Tx} rappresenta la potenza di trasmissione, G_a il guadagno d'antenna e B la larghezza di banda della trasmissione. Questi parametri comunemente dipendono dalla specifica frequenza portante in esame. N_0 è la densità spettrale di potenza del rumore e vale -147 dBm/Hz. Viene inoltre aggiunto un parametro aleatorio g per rappresentare un'ulteriore attenuazione pari ad una variabile stocastica esponenziale con valore atteso unitario.

Infine la capacità di canale viene stimata usando la formula di Shannon-Hartley [13]

$$C = B \cdot \log_2(1 + SNR). \quad (3.5)$$

3.2. MODELLAZIONE DEL CANALE NTN

3.2.1 SCENARI

Come da specifiche 3GPP [2], in questo elaborato vengono considerati quattro scenari di propagazione: rurale, suburbano, urbano e urbano denso. Questi scenari raggruppano le possibili condizioni della comunicazione in relazione alla posizione del ricevitore terrestre.

In prima analisi questi scenari servono a stimare la probabilità che in un dato momento ci si trovi in linea di vista diretta con il satellite. A seguire verrà usato il termine Line Of Sight (LOS) quando si è in linea di vista col satellite, e Non-Line Of Sight (NLOS) nel caso opposto.

| Angolo di elevazione | Urbano denso | Urbano | Suburbano e Rurale |
|----------------------|--------------|--------|--------------------|
| 10° | 28.2% | 24.6% | 78.2% |
| 20° | 33.1% | 38.6% | 86.9% |
| 30° | 39.8% | 49.3% | 91.9% |
| 40° | 46.8% | 61.3% | 92.9% |
| 50° | 53.7% | 72.6% | 93.5% |
| 60° | 61.2% | 80.5% | 94.0% |
| 70° | 73.8% | 91.9% | 94.9% |
| 80° | 82.0% | 96.8% | 95.2% |
| 90° | 98.1% | 99.2% | 99.8% |

Tabella 3.2: Probabilità di essere in linea di vista col satellite

| Angolo di elevazione | S-Band | | | Ka-Band | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|---------|--------------------|--------------------|---------|
| | LOS | NLOS | | LOS | NLOS | |
| | σ_{SF} (dB) | σ_{SF} (dB) | CL (dB) | σ_{SF} (dB) | σ_{SF} (dB) | CL (dB) |
| 10° | 3.5 | 15.5 | 34.3 | 2.9 | 17.1 | 44.3 |
| 20° | 3.4 | 13.9 | 30.9 | 2.4 | 17.1 | 39.9 |
| 30° | 2.9 | 12.4 | 29.0 | 2.7 | 15.6 | 37.5 |
| 40° | 3.0 | 11.7 | 27.7 | 2.4 | 14.6 | 35.8 |
| 50° | 3.1 | 10.6 | 26.8 | 2.4 | 14.2 | 34.6 |
| 60° | 2.7 | 10.5 | 26.2 | 2.7 | 12.6 | 33.8 |
| 70° | 2.5 | 10.1 | 25.8 | 2.6 | 12.1 | 33.3 |
| 80° | 2.3 | 9.2 | 25.5 | 2.8 | 12.3 | 30.0 |
| 90° | 1.2 | 9.2 | 25.5 | 0.6 | 12.3 | 32.9 |

Tabella 3.3: SF e CL per scenario urbano denso.

| Angolo di elevazione | S-Band | | | Ka-Band | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|---------|--------------------|--------------------|---------|
| | LOS | NLOS | | LOS | NLOS | |
| | σ_{SF} (dB) | σ_{SF} (dB) | CL (dB) | σ_{SF} (dB) | σ_{SF} (dB) | CL (dB) |
| 10° | 4 | 6 | 34.3 | 4 | 6 | 44.3 |
| 20° | 4 | 6 | 30.9 | 4 | 6 | 39.9 |
| 30° | 4 | 6 | 29.0 | 4 | 6 | 37.5 |
| 40° | 4 | 6 | 27.7 | 4 | 6 | 35.8 |
| 50° | 4 | 6 | 26.8 | 4 | 6 | 34.6 |
| 60° | 4 | 6 | 26.2 | 4 | 6 | 33.8 |
| 70° | 4 | 6 | 25.8 | 4 | 6 | 33.3 |
| 80° | 4 | 6 | 25.5 | 4 | 6 | 33.0 |
| 90° | 4 | 6 | 25.5 | 4 | 6 | 32.9 |

Tabella 3.4: SF e CL per scenario urbano.

| Angolo di elevazione | S-Band | | | Ka-Band | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|---------|--------------------|--------------------|---------|
| | LOS | NLOS | | LOS | NLOS | |
| | σ_{SF} (dB) | σ_{SF} (dB) | CL (dB) | σ_{SF} (dB) | σ_{SF} (dB) | CL (dB) |
| 10° | 1.79 | 8.93 | 19.52 | 1.9 | 10.7 | 29.5 |
| 20° | 1.14 | 9.08 | 18.17 | 1.6 | 10.0 | 24.6 |
| 30° | 1.14 | 8.78 | 18.42 | 1.9 | 11.2 | 21.9 |
| 40° | 0.92 | 10.25 | 18.28 | 2.3 | 11.6 | 20.0 |
| 50° | 1.42 | 10.56 | 18.63 | 2.7 | 11.8 | 18.7 |
| 60° | 1.56 | 10.74 | 17.68 | 3.1 | 10.8 | 17.8 |
| 70° | 0.85 | 10.17 | 16.50 | 3.0 | 10.8 | 17.2 |
| 80° | 0.72 | 11.52 | 16.30 | 3.6 | 10.8 | 16.9 |
| 90° | 0.72 | 11.52 | 16.30 | 0.4 | 10.8 | 16.8 |

Tabella 3.5: SF e CL per scenario suburbano e rurale.

Per ricavare i valori di SF e CL si utilizzano le Tabelle 3.3, 3.4 e 3.5. Ogni scenario specifica quale tabella bisogna consultare, ed incrociando l'angolo di elevazione con lo stato di visibilità e la banda di frequenze desiderate si ricavano i valori desiderati.

3.3 IMPLEMENTAZIONE DEL SIMULATORE

Per realizzare i seguenti studi è stata creata una semplice topologia punto a punto, dove un nodo trasmettitore rappresenta il satellite mentre il secondo nodo, che funge da ricevitore, rappresenta la stazione terrestre. I livelli ISO/OSI Network (3) e Data Link (2) sono stati considerati ideali, mentre si è prestato

3.3. IMPLEMENTAZIONE DEL SIMULATORE

particolare attenzione al Livello Fisico (1), Trasporto (4) e Applicazione (7).

Il nodo trasmettitore presenta un'applicazione, implementata su ns-3 estendendo la classe `OnOffApplication`, la quale genera un numero costante di dati per unità di tempo, e che vengono passati al livello sottostante come pacchetti da 1448 Byte. Al ricevitore, i pacchetti vengono consumati da un'istanza della classe `PacketSink`.

Al livello trasporto è installato un socket TCP con buffer virtualmente infinito, per evitare la perdita di pacchetti ai livelli più alti. Questo socket permette di scegliere l'implementazione TCP che si intende studiare.

Viene poi simulato un canale non simmetrico: mentre il flusso da trasmettitore a ricevitore passa per il canale modellato come da specifiche precedentemente esposte, il flusso di controllo da ricevitore a trasmettitore è ideale, dunque non vi saranno mai problemi dovuti ad ACK persi.

Al livello fisico viene valutata la qualità del segnale di ogni pacchetto al ricevitore e, quando questo non è sufficiente per essere decodificato correttamente, viene scartato.

3.3.1 PARAMETRI DI INGRESSO

Il simulatore accetta come parametri d'ingresso:

- Algoritmo di controllo di congestione TCP;
- Distanza del satellite dalla superficie terrestre;
- Elevazione del satellite;
- Frequenza portante;
- Scenario;
- Rateo di generazione dei pacchetti dell'applicazione; e
- Soglia dell'SNR.

FREQUENZA PORTANTE

Per le simulazioni di questo elaborato sono state utilizzate due famiglie di frequenze portanti: banda Ka e banda S. La scelta della frequenza portante specifica una serie di parametri, riportati in Tabella 3.6, utilizzati dal simulatore per modellare il canale.

| Parametri | Banda S | | Banda Ka | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| | LEO | GEO | LEO | GEO |
| f_c | 2 GHz | | 20 GHz | |
| B | 30 MHz | | 400 MHz | |
| P_{Tx} | 48.77 dBm | 52.77 dBm | 21.52 dBm | 37.5 dBm |
| G_a | 30 dB | 51 dB | 78.2 dB | 98.2 dB |

Tabella 3.6: Parametri per bande S e Ka.

Preliminarmente si può notare dalla Tab. 3.1 come comunicazioni in banda S non risentano dell'attenuazione atmosferica, mentre per la banda Ka tale contributo diventi considerevole per basse elevazioni del satellite. Tuttavia un valore B superiore permette alla banda Ka di raggiungere capacità maggiore (Eq. 3.5) e dunque performance migliori.

SOGLIA DELL'SNR

La modellazione del canale permette di trovare l'SNR di ogni pacchetto al ricevitore, che a sua volta consente di capire la qualità del segnale ricevuto. Per simulare la ricezione di pacchetti corrotti, il simulatore confronta l'SNR di ogni pacchetto con una soglia. Se tale valore è inferiore alla soglia, allora il pacchetto arrivato non è decodificabile correttamente e viene dunque scartato.

Il simulatore permette di impostare la soglia dell'SNR per prendere in considerazione l'utilizzo di vari tipi di decodificatore al ricevitore. Un decodificatore complesso permette di ricostruire il pacchetto originale anche nell'eventualità in cui esso sia arrivato con valori di SNR bassi. Al contrario, un decodificatore più semplice non concede tali tolleranze e dunque finirà per scartare più pacchetti.

4

Analisi

In questo capitolo verranno presentati i risultati delle simulazioni fatte. Ogni paragrafo tratterà in particolare come le performance della comunicazione vengano alterate da un parametro specifico.

4.1 METODOLOGIA

Tutti i risultati sono stati ottenuti utilizzando il metodo Monte Carlo, lanciando numerose volte le simulazioni per ottenere risultati statisticamente significativi.

Per gli studi relativi all'SNR, la simulazione non scarta nessun pacchetto ma analizza tutti i parametri necessari per ricavare i risultati desiderati. Questo permette di avere un numero consistente di pacchetti analizzati per simulazione, indipendentemente dalla qualità della comunicazione. Per le metriche relative alle prestazioni della comunicazione invece è stato implementato il canale come da specifiche.

4.2 CONDIZIONE NLOS

Una prima importante analisi da fare riguarda gli effetti delle condizioni di visibilità (i.e., LOS o NLOS) tra trasmettitore e ricevitore.

Dalle tabelle 3.3, 3.4 e 3.5 si può subito notare come la condizione di NLOS vada ad aggiungere contributi importanti all'attenuazione del segnale. Vi è sia

4.3. ANALISI TEMPORALE

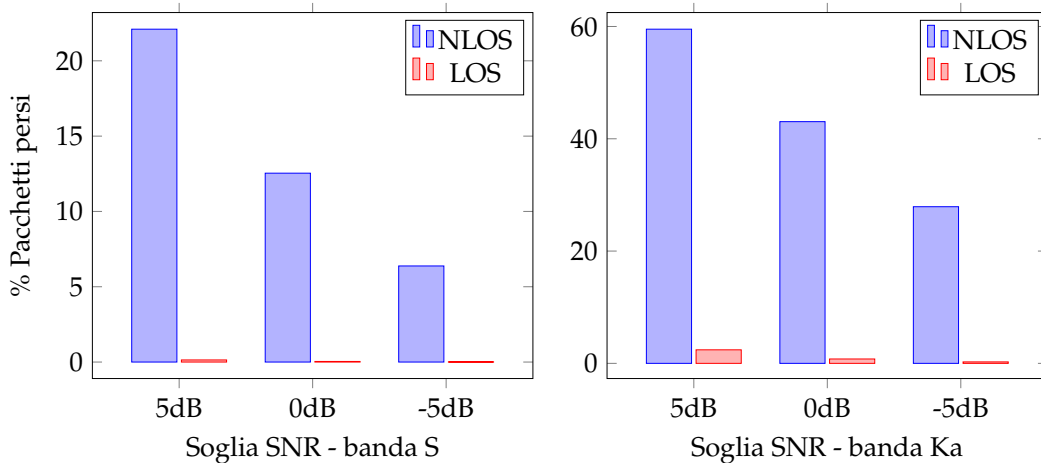


Figura 4.1: Confronto condizioni di visibilità con distanza del satellite da Terra di 200 km, elevazione di 90°, e scenario rurale

un aumento significativo della varianza dello SF , che porta ad avere una maggiore variazione del PL , ma aggiunge soprattutto un contributo di attenuazione CL fino ad oltre 40 dB.

Studiando il valore dell'SNR si nota subito come la condizione NLOS renda completamente impossibile la comunicazione. I risultati mostrati in figura 4.1 sono stati ottenuti con satellite perpendicolarmente sopra al ricevitore (i.e., con un angolo di elevazione pari a 90 gradi) e in uno scenario rurale, ovvero dove l'attenuazione dovuta alla condizione NLOS è meno impattante. Nonostante ciò, si nota come la differenza di pacchetti persi tra le due condizioni di visibilità sia molto significativa indipendentemente dalla banda e dalla soglia SNR utilizzata. In particolare, la trasmissione in NLOS è associata ad una perdita di pacchetti sempre superiore al 5%, ed in alcuni casi anche al di sopra del 50%, valori che sono di fatto incompatibili con qualsiasi sistema di comunicazione.

Alla luce di questi risultati, per le successive simulazioni si assumerà sempre di operare in una condizione di visibilità LOS, indipendentemente dalla probabilità effettiva di esserlo, come mostrato nella tabella 3.2.

4.3 ANALISI TEMPORALE

Per comprendere come la perdita di pacchetti alteri l'efficacia della comunicazione, viene ora presa in esame una simulazione in cui è possibile osservare

l'evoluzione del protocollo TCP nel tempo.

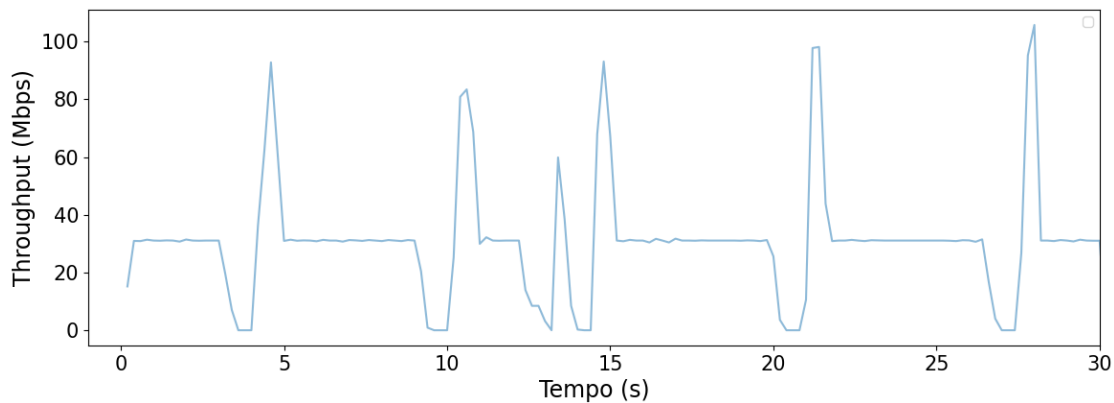


Figura 4.2: Throughput in funzione del tempo. Il rate dell'applicazione è di 30 Mbps, e la capacità del canale è assunta arbitrariamente alta.

Per questa simulazione è stato impostato un tasso di generazione dell'applicazione di 30 Mbps, mentre la capacità del canale è arbitrariamente alta. In tali condizioni ideali di comunicazione, ci aspettiamo che il throughput si assesti rapidamente a 30 Mbps, per poi mantenere tale valore durante tutta la simulazione.

Al contrario, il grafico temporale del throughput in figura 4.2 mostra che vi sono dei momenti in cui il throughput cala drasticamente, successivamente seguiti da un picco, per poi assestarsi nuovamente a 30 Mbps.

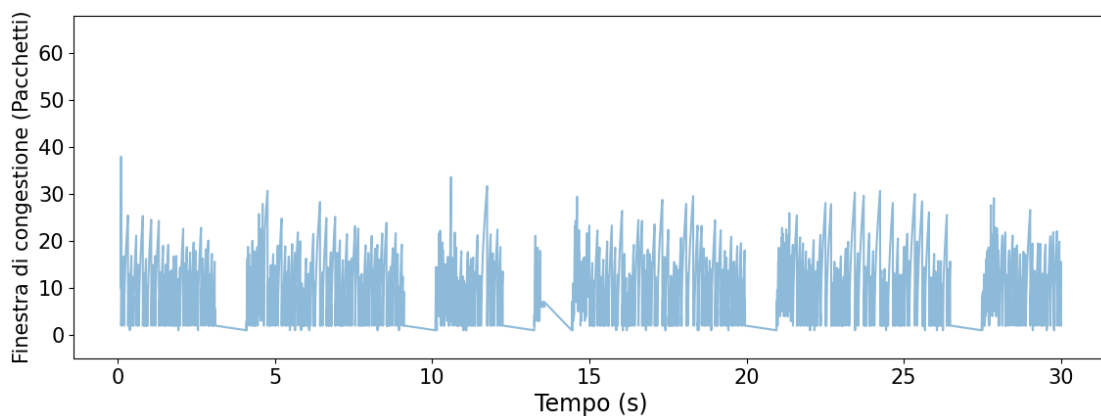


Figura 4.3: Variazione della finestra di congestione in funzione del tempo. Il rate dell'applicazione è di 30 Mbps, e la capacità di canale è assunta arbitrariamente alta

4.4. ANALISI SATELLITI GEO

Analizzando anche il grafico della finestra di congestione (cwnd) in figura 4.3 si nota che la comunicazione è in realtà affetta da numerosi “errori”, individuabili dai numerosi picchi. Nella maggior parte dei casi, tuttavia, TCP riesce comunque a mantenere un throughput costante e stabile attorno ai 30 Mbps. Questo andamento è dovuto alla fase di “Fast Recovery” di TCP e alla ricezione di 3 ACK duplicati, dove viene rilevata congestione lieve.

La comunicazione si deteriora drasticamente invece quando si verifica un evento Retransmission Timeout (RTO), ovvero quando non si riceve un pacchetto di ACK per un dato periodo di tempo. In questa condizione si nota come la cwnd si assesti a 0 e, di conseguenza, non vengono inviati pacchetti fino allo scadere dell’RTO. Se ciò provoca un evidente deterioramento delle prestazioni di comunicazione, a seguito di questo evento si ha un picco di throughput (si vedano i picchi in figura 4.2) perché l’applicazione continua a generare pacchetti indipendentemente dalle condizioni di canale, dunque questi verranno memorizzati nel buffer del Livello 4 per poi essere trasmessi dopo l’evento RTO, al ripristinarsi di condizioni di trasmissione favorevoli.

4.4 ANALISI SATELLITI GEO

L’altitudine di 35.863 km dei satelliti GEO comporta, anche in condizioni ideali, un ritardo di propagazione one-way di circa 120 ms, che pone una notevole sfida alle implementazioni TCP analizzate. A ciò va aggiunta un’attenuazione del segnale significativa a causa delle elevate distanze in gioco, che produce valori di SNR molto bassi.

Per queste simulazioni sono stati utilizzati i seguenti parametri:

- Tasso di generazione dei pacchetti all’applicazione: 30 Mbps
- Elevazione: 90°
- Scenario: Rurale
- Distanza: 35.863 km
- Soglia SNR: 0 dB
- Tempo di simulazione: 30 s

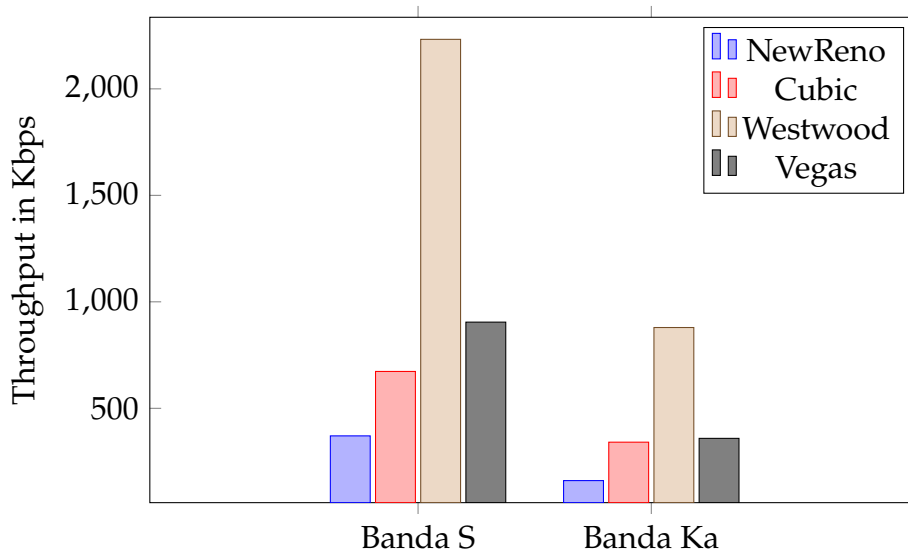


Figura 4.4: Effetti implementazioni TCP per satelliti GEO, con rate dell'applicazione di 30 Mbps e elevazione di 90°

Dal grafico in figura 4.4 si evince come, indipendentemente dall'implementazione dell'algoritmo di controllo di congestione TCP, la trasmissione spazio-Terra usando satelliti GEO risulta poco efficace. Da un lato, la condizione ottimale sarebbe avere un throughput prossimo al tasso con cui vengono generati i pacchetti all'applicazione. Al contrario, il throughput misurato è molto più basso, i.e., spesso al di sotto di 1 Mbps, il che implica un accumulo di pacchetti nel buffer TCP, dove solo una piccola frazione di essi viene effettivamente inviata.

Inoltre, da simulazioni effettuate offline si è misurato come la percentuale di pacchetti persi sia molto alta, i.e., intorno al 7% per la banda Ka e 4% per la banda S. Oltre ad un'elevata percentuale di pacchetti persi, i satelliti GEO ad orbite di 35.863 km risentono molto anche del ritardo di propagazione, che essendo di 120 ms (one-way) inficia sul corretto funzionamento del protocollo TCP.

Questi risultati ci portano ad escludere la possibilità di utilizzare satelliti GEO per comunicare in modo efficiente, quantomeno usando i parametri elencati nella tabella 3.6. Per utilizzare questa tipologia di piattaforme è necessario incrementare il valore dell'SNR, per esempio aumentando la potenza di trasmissione P_{Tx} o il guadagno delle antenne G_a .

4.5 ANALISI SATELLITI LEO

Ci concentriamo ora sullo studio dei satelliti LEO. Le seguenti simulazioni prendono in considerazione trasmissioni della durata di 30 secondi, che garantiscono quindi che il satellite sia sempre in una condizione di visibilità rispetto agli utenti nella sua area di copertura. Tale assunzione consente, per semplicità, di non prendere in esame l'impatto dell'*handover* tra satelliti LEO.

4.5.1 IMPATTO DELLA DISTANZA DEL SATELLITE

La distanza del satellite dal ricevitore altera direttamente il fattore di attenuazione nello spazio libero $FSPL$ (Eq. 3.3), che contribuisce ad abbassare la potenza del segnale ricevuto e di conseguenza la sua qualità. Per ipotesi, il simulatore è impostato in scenario rurale e con un'elevazione di 90° .

SNR E PROBABILITÀ D'ERRORE

Incominciamo con lo studio dei valori dell'SNR. Come si può notare dal grafico 4.5, pur partendo da valori ottimi, l'SNR cala rapidamente all'aumentare della distanza. In particolare, la disponibilità di una maggiore larghezza di banda nella famiglia di frequenze Ka viene al costo di una maggior attenuazione, che comporta un valore dell'SNR minore (i.e., circa -15 dB) rispetto alla banda S. Si noti come l'andamento convesso delle curve comporti un rapido deterioramento della qualità del segnale ricevuto.

Il grafico 4.6 mostra la percentuale di pacchetti persi in relazione ai pacchetti trasmessi. Si nota come la banda Ka, anche usando un decodificatore sofisticato che permetta la corretta ricezione di pacchetti con valori di SNR fino a -5 dB, abbia sempre una probabilità d'errore maggiore rispetto alla banda S.

Valori di errore superiori al 2% inficiano pesantemente (e negativamente) sul corretto funzionamento del protocollo TCP, dunque da questi risultati si esclude la possibilità di utilizzo della banda Ka per distanze superiori ai 400 km. Dal grafico si osserva anche che la qualità del decodificatore, i.e., la soglia dell'SNR, altera sensibilmente la probabilità d'errore sul pacchetto; per sfruttare quindi satelliti su orbite più elevate (e.g., per godere di un raggio di copertura maggiore), è necessario utilizzare decodificatori più tolleranti al rumore.

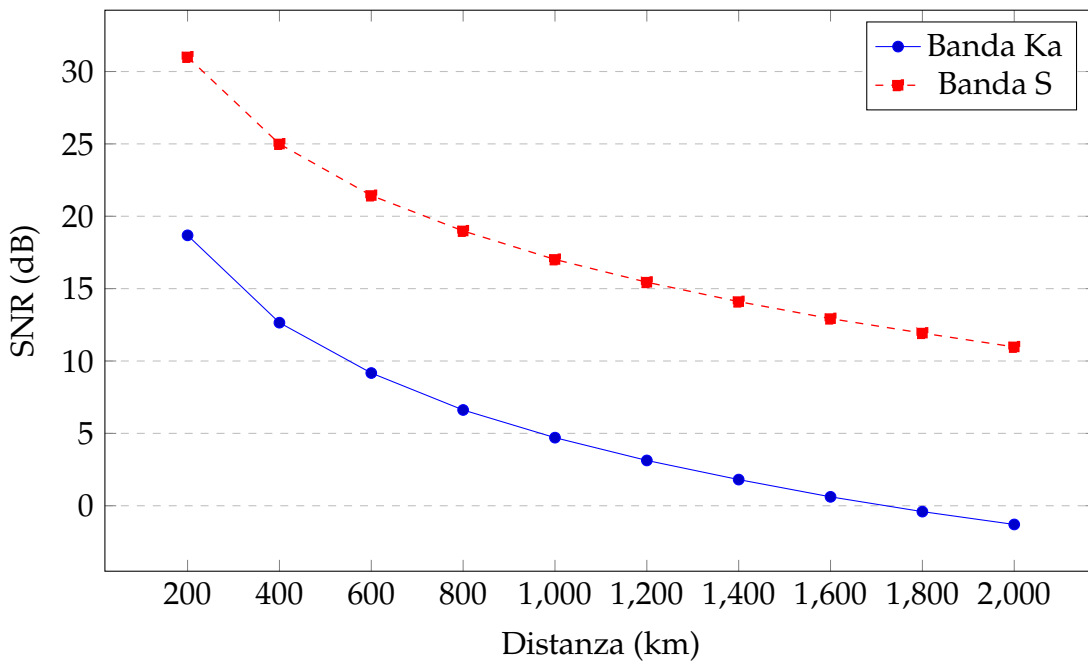


Figura 4.5: SNR medio al variare della distanza per bande Ka e S

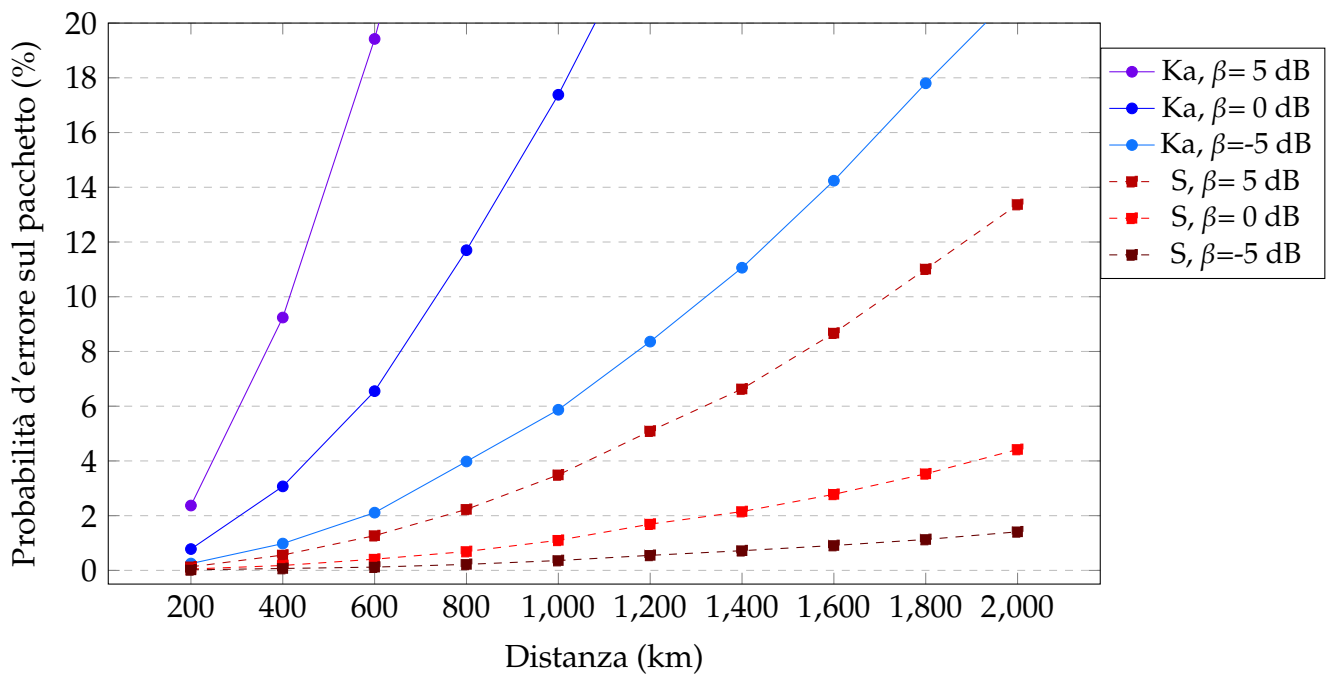


Figura 4.6: Probabilità d'errore sul pacchetto al variare della distanza per bande Ka e S con diverse soglie di SNR β

THROUGHPUT

Per studiare le prestazioni della comunicazione in termini di throughput sono stati considerati i seguenti parametri:

4.5. ANALISI SATELLITI LEO

- Algoritmo di controllo di congestione TCP: NewReno
- Tasso di generazione dei pacchetti: 30 Mbps
- Soglia SNR: 0 dB

Dai risultati delle simulazioni in figura 4.7 si evince che le precedenti supposizioni erano corrette. Si nota che l'efficienza della banda Ka crolla già ad una distanza di 400 km, rendendo impossibile la comunicazione a distanze superiori. Anche la banda S risente molto dell'aumento della distanza, tuttavia mantiene ottimi livelli di throughput fino a circa 800 km, presentando poi un successivo calo, seppur più graduale, delle prestazioni.

Si può dunque confermare che l'utilizzo della banda Ka con i parametri riportati nella tabella 3.6 è possibile solo per satelliti LEO molto vicini alla Terra. Per sfruttare i vantaggi di un satellite ad orbite più elevate è necessario l'utilizzo della banda S.

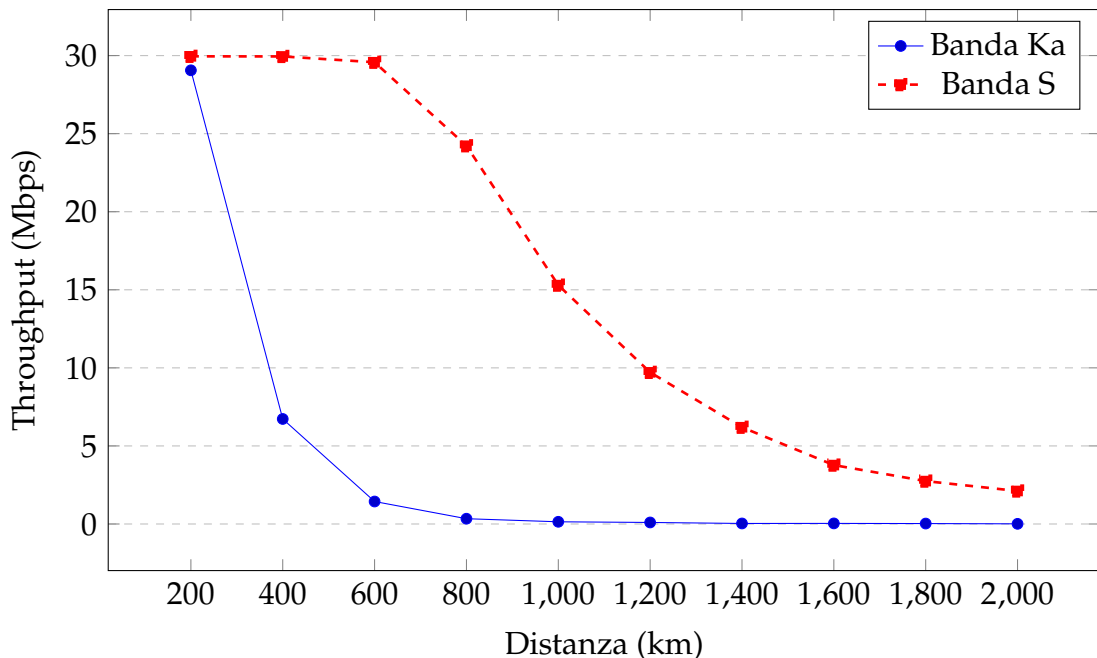


Figura 4.7: Throughput al variare della distanza per bande Ka e S, con rate dell'applicazione di 30 Mbps, elevazione di 90° e soglia SNR di 0 dB

CONFRONTO IMPLEMENTAZIONI TCP

Vengono ora ripetute le misurazioni confrontando tra loro alcuni algoritmi di controllo di congestione del protocollo TCP¹.

Per quanto riguarda la banda Ka, l'elevata probabilità d'errore rende inefficienti tutte le implementazioni testate. Cubic presenta un throughput leggermente più elevato delle altre implementazioni, dovuto alla maggiore aggressività dell'algoritmo durante la fase di "Slow Start", che comporta un invio massiccio di pacchetti. Si noti comunque che, in condizioni di canale particolarmente sfavorevoli, molti di questi pacchetti non arriveranno in sequenza, e saranno dunque necessarie numerose ritrasmissioni per ricevere correttamente il messaggio. Tuttavia, nessuna delle implementazioni testate riesce a raggiungere un valore di throughput sufficiente a rendere possibile la trasmissione oltre i 200 km, dunque il grafico viene omissis.

Usando la banda S, il grafico 4.8 mostra il throughput confrontando i tre algoritmi per il controllo della congestione presi in analisi. L'algoritmo Cubic, nonostante sia uno dei più popolari, non è adatto all'utilizzo in un contesto NTN, presentando prestazioni peggiori rispetto al più semplice NewReno. Cubic infatti dapprima accresce aggressivamente la cwnd durante la fase di "Slow Start" inviando un numero insostenibile di pacchetti, molti dei quali verranno persi. Per rispondere a questa criticità, Cubic tenderà quindi ad operare in maniera molto più conservativa, riducendo drasticamente la cwnd e assestandosi su valori di throughput relativamente bassi.

Westwood invece presenta livelli di throughput superiori. Questo è dovuto al suo algoritmo di stima della capacità di canale, che garantisce di rispondere in maniera meno conservativa alla perdita di un pacchetto: la cwnd non viene pertanto impostata ad 1 MSS, ma mantiene un valore più alto per garantire un flusso costante di trasmissione. Questo ci permette di dedurre che tale algoritmo di stima della capacità del canale possa essere utilizzato efficacemente in un contesto NTN.

¹Non viene mostrato Vegas in quanto presenta andamenti anomali strutturali. Il suo meccanismo di controllo dello stato della rete basato su valori di RTT non interpreta correttamente la perdita di pacchetti in alcune circostanze, portando a performance peggiori.

4.5. ANALISI SATELLITI LEO

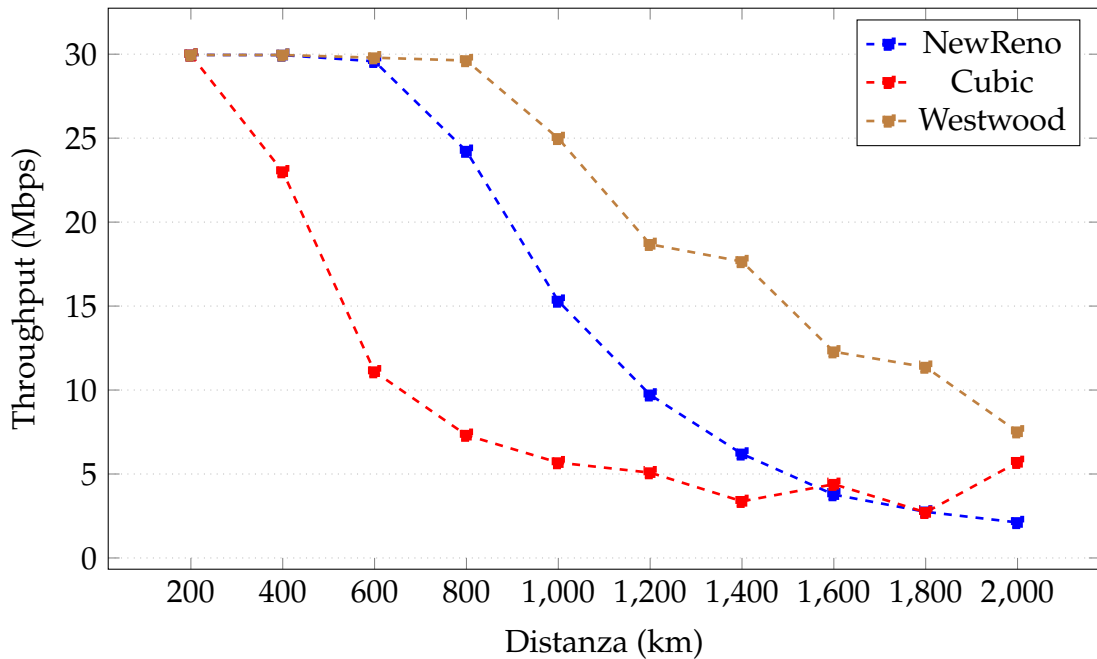


Figura 4.8: Throughput banda S al variare delle implementazioni TCP, assumendo rate dell'applicazione di 30 Mbps, elevazione di 90° e soglia SNR di 0 dB

4.5.2 IMPATTO DELL'ANGOLO DI ELEVAZIONE DEL SATELLITE

I satelliti LEO, orbitando molto vicini alla superficie terrestre ed a velocità non trascurabili, devono garantire buone prestazioni durante tutto il periodo di visibilità, e al variare dell'angolo di elevazione rispetto al ricevitore terrestre. In particolare, riuscire a garantire buone prestazioni di comunicazione anche a basse elevazioni permette di usare una costellazione di satelliti meno fitta, che comporterebbe un minor numero di handovers e quindi una minore complessità.

Tutte le simulazioni di questa sezione sono state ottenute in uno scenario rurale, per un satellite a 200 km dalla superficie terrestre.

SNR

Le condizioni iniziali dell'SNR sono le medesime dello studio precedente, e mostrano una curva concava; questo ci permette di intuire che la potenza del segnale ricevuto è simile per angolazioni elevate, e cala rapidamente per angolazioni basse.

Come descritto nella tabella 3.1, la banda Ka risente anche di attenuazioni aggiuntive dovute all'atmosfera, apprezzabile dalla maggior pendenza negativa

del grafico per elevazioni basse.

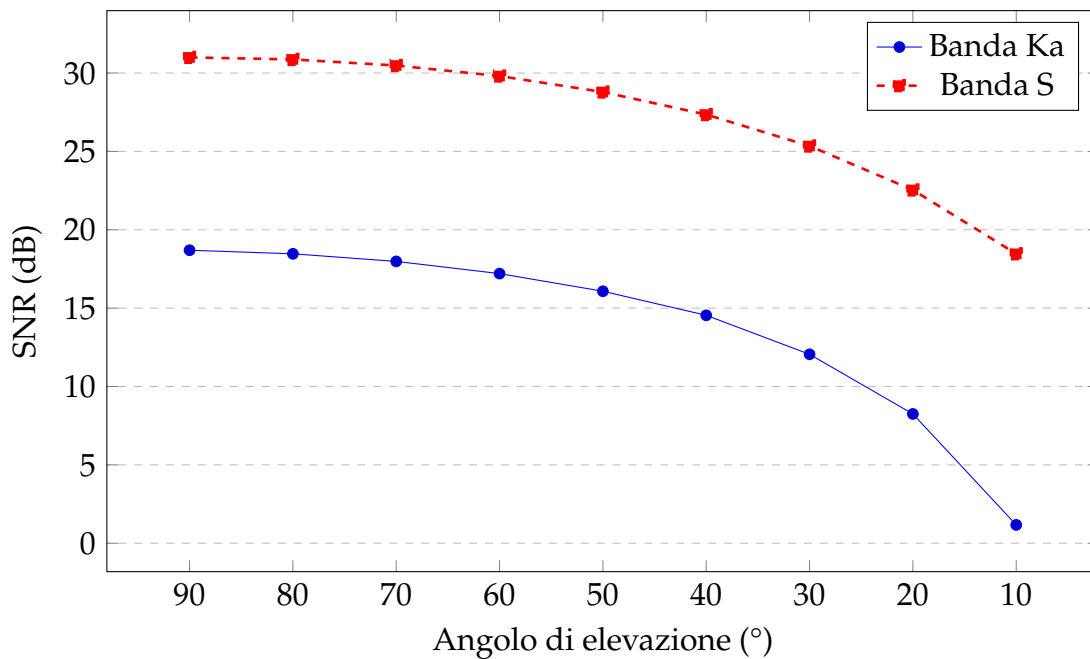


Figura 4.9: SNR al variare dell'angolo di elevazione per bande Ka e S

THROUGHPUT

Per questa campagna di simulazioni sono stati usati i seguenti parametri:

- Algoritmo di controllo di congestione TCP: NewReno
- Tasso generazione pacchetti: 30 Mbps
- Soglia SNR: 0 dB

Il grafico 4.10 mostra come varia il throughput al diminuire dell'angolo di elevazione, considerando bande Ka ed S. La curva concava dell'SNR permette ad entrambe le bande di mantenere un buon livello iniziale; tuttavia, nel caso della banda Ka, il throughput inizia a degradare considerevolmente già a partire da un'elevazione di 50° (vs. 20° per la banda S), impedendo quindi la comunicazione a basse elevazioni.

CONFRONTO IMPLEMENTAZIONI TCP

La banda S presenta ottimi risultati di throughput (non inclusi in questa tesi) usando tutte le implementazioni TCP prese in esame. Risulta però inte-

4.5. ANALISI SATELLITI LEO

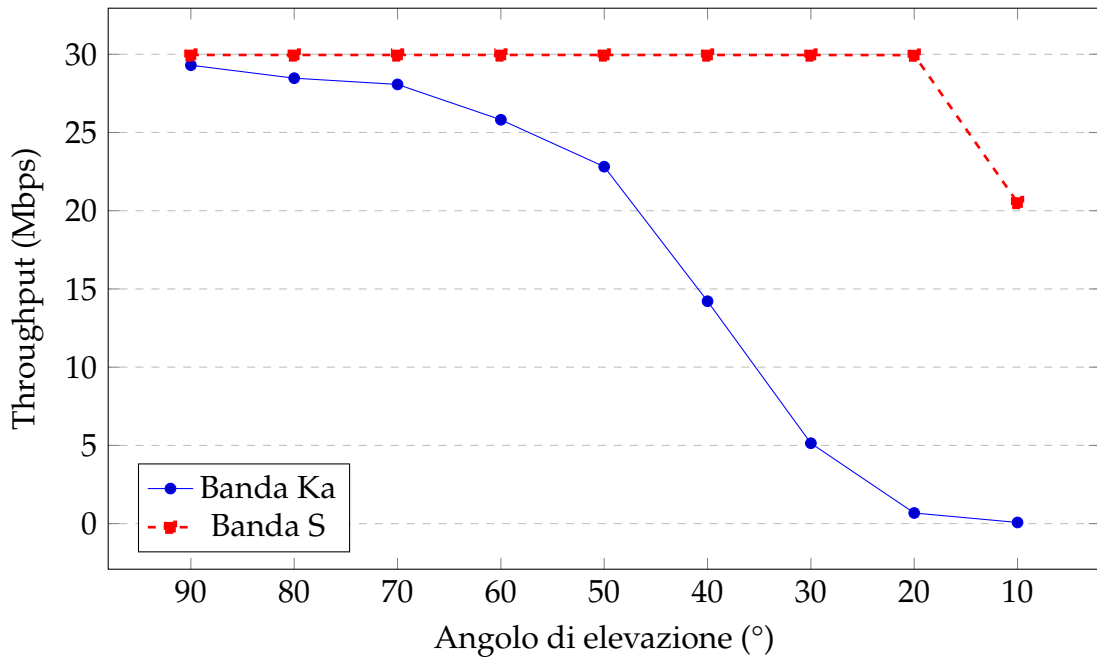


Figura 4.10: Throughput al variare dell'angolo di elevazione per bande Ka e S, con rate dell'applicazione di 30 Mbps, distanza del satellite dalla Terra di 200 km e soglia SNR a 0 dB

ressante valutare la metrica della latenza media per pacchetto, come riportato in figura 4.11. Con latenza si intende il tempo che intercorre tra la generazione di un pacchetto e la sua corretta ricezione, tenendo quindi in conto di eventuali ritrasmissioni. Cubic è l'algoritmo che comporta valori di latenza più bassi quando il rapporto segnale rumore (SNR) è alto, mentre Westwood mantiene livelli contenuti anche in condizioni meno favorevoli. Cubic risponde in maniera aggressiva a eventi che ritiene di congestione lieve come la perdita di un pacchetto, al fine di tornare rapidamente a sfruttare al massimo il canale non appena la congestione è passata; questo meccanismo risulta ottimale quando la perdita di pacchetti è sporadica, mentre inficia sulla trasmissione quando la probabilità d'errore per pacchetto aumenta. Westwood, oltre ad essere meno aggressivo di Cubic, sfrutta un meccanismo di valutazione dello stato della rete per stimare il valore ottimale della finestra di congestione da impostare dopo la perdita di un pacchetto, producendo un flusso più costante di pacchetti rispetto agli altri due algoritmi.

A differenza di quanto visto nelle precedenti simulazioni, nel caso della banda Ka, Westwood non migliora la comunicazione, e anzi risulta peggiore del più

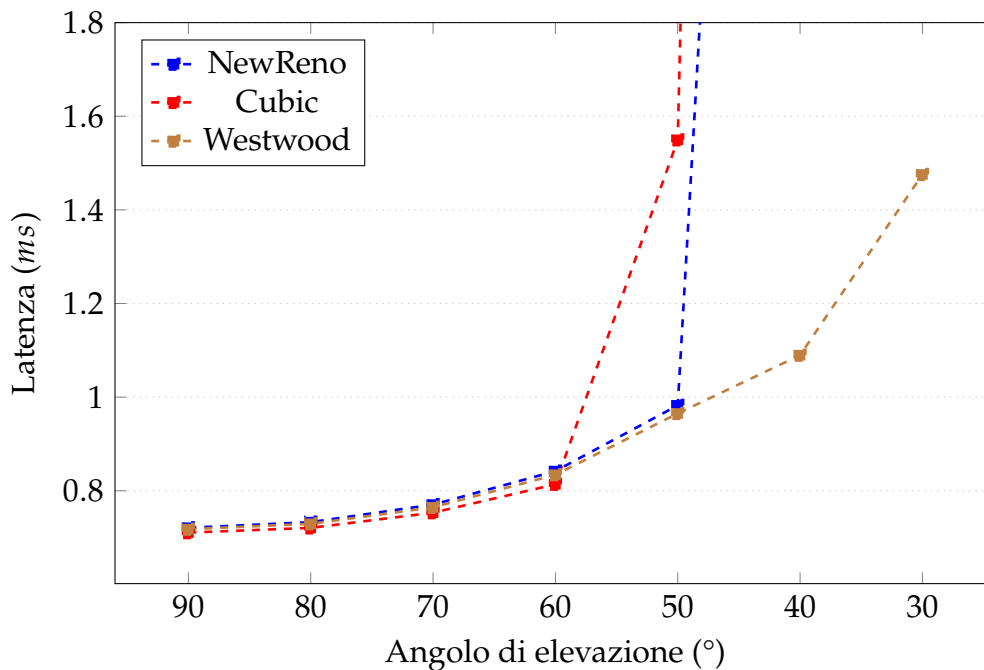


Figura 4.11: Latenza al variare dell'angolo di elevazione e algoritmo di controllo di congestione per banda S, assunto rate dell'applicazione di 30 Mbps, distanza del satellite dalla Terra di 200 km e soglia SNR a 0 dB

semplice NewReno, come visibile dal grafico 4.12. Questo probabilmente è dovuto ad una stima errata della capacità disponibile da parte dell'algoritmo. Si nota quindi dalle analisi temporali che a seguito di un evento RTO Westwood non è in grado di ristabilire rapidamente un flusso di trasmissione stabile.

Cubic presenta un picco all'elevazione di 20° che è tuttavia dovuto ad un'errata valutazione dell'algoritmo. Cubic, infatti, porta a trasmettere molti pacchetti in brevi finestre di tempo, alcuni dei quali saranno tuttavia scartati in condizioni sfavorevoli di canale; la maggior parte di essi arriveranno quindi non in sequenza, necessitando di varie ritrasmissioni per la corretta ricezione del messaggio. L'anomalo aumento di throughput per Cubic a tale elevazione non è dunque sinonimo di migliori prestazioni.

4.5. ANALISI SATELLITI LEO

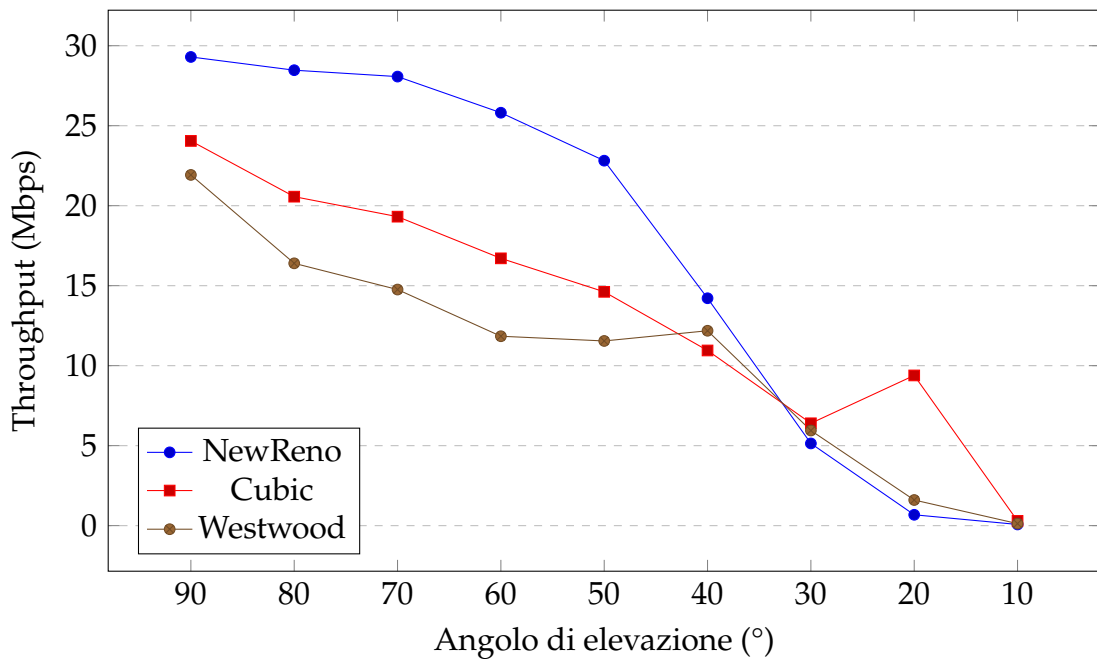


Figura 4.12: Throughput al variare dell'angolo di elevazione e algoritmo di controllo di congestione per banda Ka, con rate dell'applicazione di 30 Mbps, distanza del satellite dalla Terra di 200 km e soglia SNR pari a 0 dB

4.5.3 IMPATTO DEL RATE DELL'APPLICAZIONE

In tutte le precedenti simulazioni è stato volontariamente considerato un rate di generazione dei pacchetti all'applicazione pari a 30 Mbps, al fine di valutare la risposta degli algoritmi di controllo di congestione del protocollo TCP. Questo implica un limite superiore di 30 Mbps al throughput, che non rispecchia dunque l'effettiva capacità del canale, e nasconde il potenziale beneficio di usare le bande Ka. Come riportato in tabella 3.6, infatti, le bande Ka godono di una larghezza di banda maggiore rispetto alle bande S, il che aumenta significativamente la capacità del canale, permettendo quindi di trasmettere a velocità potenzialmente maggiori.

Usando la formula di Shannon (Eq. 3.5), e valutando la capacità di canale con distanza del satellite dalla Terra di 200 km ed elevazione variabile, si ricavano i valori nella tabella 4.1. Si evince come, nonostante l'SNR nelle bande Ka sia, in media, inferiore di circa 15 dB rispetto alle bande S, la capacità di canale sia fino a 7.5 volte superiore ad un'elevazione di 90°.

| Angolo di elevazione | Banda Ka (Mbps) | Banda S (Mbps) |
|----------------------|-----------------|----------------|
| 90° | 2492 | 309 |
| 80° | 2462 | 308 |
| 70° | 2398 | 304 |
| 60° | 2296 | 297 |
| 50° | 2150 | 286 |
| 40° | 1952 | 272 |
| 30° | 1636 | 252 |
| 20° | 1176 | 224 |
| 10° | 482 | 184 |

Tabella 4.1: Capacità canale per bande Ka e S per satelliti a distanza di 200 km

Per vedere come le simulazioni rispondano ad applicazioni che generano più dati sono stati impostati i seguenti parametri:

- Scenario: rurale
- Soglia SNR: 0 dB
- Distanza: 200 km
- Elevazione variabile
- Tasso di generazione pacchetti all'applicazione pari alla capacità del canale

Provando dunque ad aumentare il tasso di generazione dei pacchetti per sfruttare al massimo la capacità di canale, si nota dal grafico 4.13 che le prestazioni nella banda S sono comunque superiori che nella banda Ka. Nonostante la capacità di canale nominale di quest'ultima sia nettamente superiore che nella sua controparte S, il numero di pacchetti persi a causa delle condizioni di canale più sfavorevoli (misurate, e.g., in termini di SNR), e le conseguenti ritrasmissioni, rendono la rete più congestionata, ed impediscono a TCP di sfruttare tutta la banda disponibile. La banda S invece, avendo valori di SNR maggiori, sfrutta al massimo la sua (seppur ridotta) capacità di canale, raggiungendo il limite nominale previsto in tabella 4.1.

E' lecito pensare che, considerando UDP al livello di trasporto, e quindi eliminando l'effetto delle ritrasmissioni, il throughput nelle bande Ka sia ragionevolmente superiore che nelle bande S. Questo allo stesso tempo motiva maggiori

4.5. ANALISI SATELLITI LEO

sforzi di ricerca nello sviluppo di nuove varianti TCP capaci di massimizzare le prestazioni di comunicazione anche nelle bande Ka.

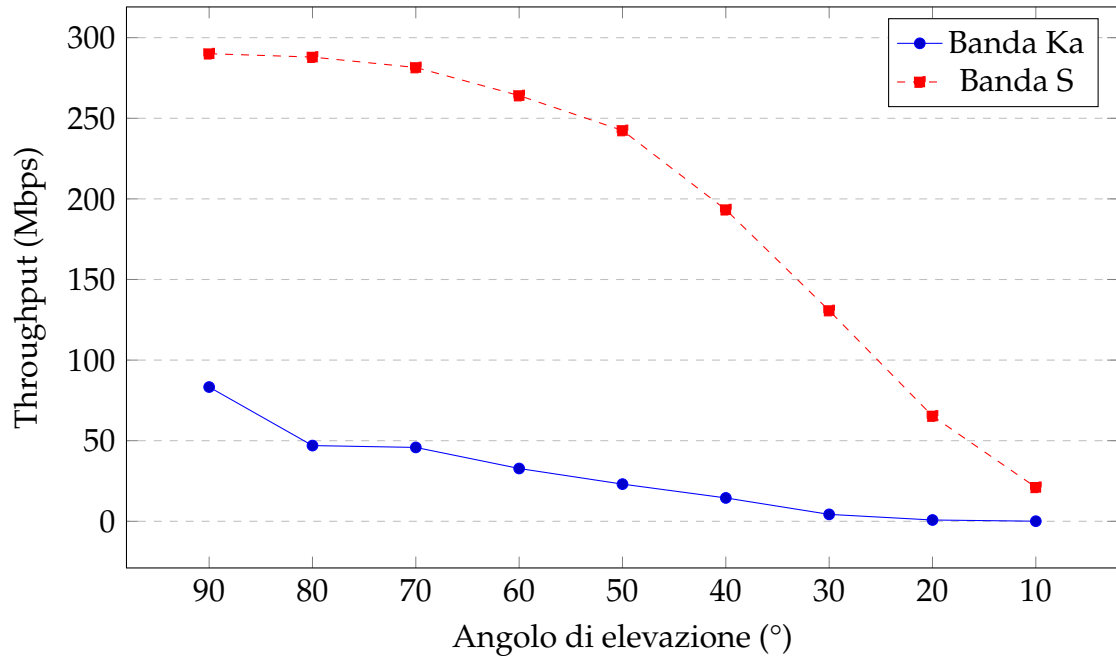


Figura 4.13: Throughput al variare dell'angolo di elevazione per banda Ka e S, con rate dell'applicazione pari alla capacità, distanza di 200 km e soglia SNR di 0 dB

5

Conclusione

In questo elaborato sono stati fatti degli studi mediante simulazioni ns-3 per analizzare come le implementazioni attuali del protocollo TCP rispondano ad un canale ad alta latenza e con elevato disturbo tipico delle reti non terrestri (NTN), con lo scopo di studiare la possibilità di usare satelliti artificiali a varie altitudini come nodi Internet.

Inizialmente sono stati introdotti concetti chiave per capire l'ambiente applicativo di tali studi. In particolare è stato trattato il concetto di NTN, valutandone le opportunità applicative e le piattaforme utilizzate, per poi descrivere brevemente il protocollo TCP elaborando sugli algoritmi di controllo di congestione che sono stati studiati nel resto dell'elaborato.

Successivamente è stato descritto il simulatore ns-3 utilizzato per le analisi sperimentali, nel quale è stata implementato il modello di canale proposto da 3GPP per NTN.

Le analisi hanno prodotto alcuni risultati interessanti. In primo luogo si è dedotto come avere una condizione di visibilità diretta col satellite sia fondamentale per una corretta comunicazione. Questo porta ad escludere l'utilizzo di satelliti in scenari urbani o indoor, salvo si riesca a garantire una probabilità di essere in linea di vista diretta sufficientemente alta, avendo per esempio delle stazioni terrestri sopraelevate.

Il parametro fondamentale che deve essere minimizzato per garantire il successo delle comunicazioni è la probabilità d'errore sul pacchetto, che dipende dalla relazione tra SNR medio e soglia SNR al ricevitore. Con i parametri usati in questo elaborato descritti nella tabella 3.6, la probabilità d'errore usando satelliti

GEO è eccessiva indipendentemente dalla banda scelta, decodificatore, scenario ed elevazione. Per rendere possibile l'utilizzo di questa tipologia di satelliti è dunque necessario alzare l'SNR, aumentando la potenza di trasmissione o il guadagno delle antenne, o usare decodificatori più sofisticati che permettano di ricevere correttamente i pacchetti anche in condizioni di canale molto rumoroso.

La distanza del satellite dalla Terra è risultato essere un fattore molto incisivo per il successo della trasmissione: se a orbite relativamente piccole la comunicazione è realizzabile, non si può dire lo stesso per orbite maggiori.

Si è osservato inoltre come l'elevazione del satellite impatti altrettanto considerevolmente per valori bassi di elevazione, mentre l'attenuazione del segnale è altrimenti limitata. Questo fattore è determinante per la scelta del numero di satelliti dell'inevitabile costellazione che andrebbe creata per satelliti LEO.

L'utilizzo della banda S per questo tipo di connessioni è risultato possibile; questa famiglia di frequenze è infatti più resiliente all'attenuazione atmosferica e ai disturbi, producendo valori di SNR medio nettamente migliori della banda Ka. Tuttavia vi sono dei limiti per quanto riguarda la capacità di canale raggiungibile usando tale frequenza.

La banda Ka risulta peggiore della controparte appena descritta in tutte le circostanze. I corrispettivi valori medi di SNR bassi implicano un'elevata probabilità d'errore sul pacchetto, che rende difficile la trasmissione anche nelle condizioni più favorevoli. Nonostante i risultati insoddisfacenti di questo elaborato, la banda Ka permette di avere capacità di canale molto superiore alla banda S che, se sfruttati correttamente porterebbero ad avere connessioni molto più rapide ed efficienti. Studi futuri dovrebbero essere dunque diretti al cercare di abbassare la probabilità d'errore sul pacchetto di questa famiglia di frequenze. Ciò può essere realizzato per esempio sviluppando decodificatori più sofisticati, o aumentando i valori dell'SNR con potenze di trasmissione maggiori.

Infine si possono trarre delle conclusioni dai confronti tra le implementazioni degli algoritmi di controllo di congestione del protocollo TCP utilizzati nelle simulazioni. Tra le implementazioni analizzate è emerso che Westwood permetta, in alcune circostanze, di avere un miglioramento significativo delle prestazioni. Tuttavia questo non vale in tutte le casistiche, suggerendo la necessità di sviluppare una nuova implementazione di TCP per rispondere adeguatamente alle necessità delle reti non terrestri. Tranne NewReno, le altre implementazioni studiate cercano di ottimizzare la trasmissione stimando le condizioni della rete, questo comporta che i pacchetti scartati perché non decodificabili al ricevitore

vengano considerati scartati per via di congestione di rete, talvolta portando a stime che non corrispondono all'effettivo stato della rete.

Bibliografia

- [1] 3GPP. *Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz*. Technical Specification (TS) 38.901. v.17.0.0. Mar. 2022.
- [2] 3GPP. *Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks*. Technical Specification (TS) 38.811. v.15.4.0. Ott. 2020.
- [3] Pantelis-Daniel Arapoglou et al. «Direct Access to 5G New Radio User Equipment from NGS0 Satellites in Millimeter Waves». In: *2020 10th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 16th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC)*. 2020, pp. 1–8. DOI: 10.1109/ASMS/SPSC48805.2020.9268928.
- [4] Abdelaali Chaoub et al. «6G for Bridging the Digital Divide: Wireless Connectivity to Remote Areas». In: *IEEE Wireless Communications* 29.1 (2022), pp. 160–168. DOI: 10.1109/MWC.001.2100137.
- [5] Behrouz A. Forouzan. *Data Communications and Networking with TCP/IP Protocol Suite*. 6^a ed. McGraw-Hill, 2022.
- [6] M. Gerla et al. «TCP Westwood: congestion window control using bandwidth estimation». In: *GLOBECOM'01. IEEE Global Telecommunications Conference (Cat. No.01CH37270)*. Vol. 3. 2001, 1698–1702 vol.3. DOI: 10.1109/GLOCOM.2001.965869.
- [7] Marco Giordani e Michele Zorzi. «Non-Terrestrial Networks in the 6G Era: Challenges and Opportunities». In: *IEEE Network* 35.2 (2021), pp. 244–251. DOI: 10.1109/MNET.011.2000493.
- [8] Marco Giordani et al. «Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies». In: *IEEE Communications Magazine* 58.3 (2020), pp. 55–61. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900411.

BIBLIOGRAFIA

- [9] Tom Henderson e Sally Floyd. *The NewReno Modification to TCP's Fast Recovery Algorithm*. RFC 2582. Apr. 1999. DOI: 10.17487/RFC2582. URL: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc2582>.
- [10] Sastri Kota et al. «Satellite». In: *2022 IEEE Future Networks World Forum (FNWF)*. 2022, pp. 1–182. DOI: 10.1109/FNWF55208.2022.00141.
- [11] Abbas Mohammed et al. «The Role of High-Altitude Platforms (HAPs) in the Global Wireless Connectivity». In: *Proceedings of the IEEE* 99.11 (2011), pp. 1939–1953. DOI: 10.1109/JPROC.2011.2159690.
- [12] Nicolas Chuberre Munira Jaffar. *NTN & Satellite in Rel-17 & 18*. 2022. URL: <https://www.3gpp.org/news-events/partner-news/ntn-rel17> (visitato il 29/06/2023).
- [13] Benvenuto Nevio e Zorzi Michele. *Principles of Communications Networks and Systems*. 1^a ed. John Wiley & Sons Inc, 2011.
- [14] *ns3 - About*. URL: <https://www.nsnam.org/about/>.
- [15] Michele Polese et al. «A Survey on Recent Advances in Transport Layer Protocols». In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 21.4 (2019), pp. 3584–3608. DOI: 10.1109/COMST.2019.2932905.
- [16] *Radio Regulations*. 2016. URL: <https://search.itu.int/history/HistoryDigitalCollectionDocLibrary/1.43.48.en.101.pdf> (visitato il 29/06/2023).
- [17] Injong Rhee et al. *CUBIC for Fast Long-Distance Networks*. RFC 8312. Feb. 2018. DOI: 10.17487/RFC8312. URL: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc8312>.
- [18] Mattia Sandri et al. «Implementation of a Channel Model for Non-Terrestrial Networks in ns-3». In: *Proceedings of the 2023 Workshop on ns-3*. ACM, giu. 2023. DOI: 10.1145/3592149.3592158. URL: <https://doi.org/10.1145/3592149.3592158>.
- [19] Alessandro Vanelli-Coralli et al. «5G and Beyond 5G Non-Terrestrial Networks: trends and research challenges». In: *2020 IEEE 3rd 5G World Forum (5GWF)*. 2020, pp. 163–169. DOI: 10.1109/5GWF49715.2020.9221119.

- [20] Dengke Wang et al. «The Potential of Multilayered Hierarchical Nonterrestrial Networks for 6G: A Comparative Analysis Among Networking Architectures». In: *IEEE Vehicular Technology Magazine* 16.3 (2021), pp. 99–107. DOI: 10.1109/MVT.2021.3085168.

