

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi komunikasi satelit berperan penting dalam mendukung konektivitas Internet of Things (IoT), khususnya di wilayah yang tidak terjangkau oleh infrastruktur terestrial. Salah satu pendekatan yang semakin berkembang adalah **Direct-to-Satellite IoT (DtS-IoT)**, di mana perangkat IoT dapat berkomunikasi langsung dengan satelit Low Earth Orbit (LEO) tanpa perantara gateway darat.

Dalam skenario komunikasi uplink yang bersifat **tak terkoordinasi**, protokol akses seperti **ALOHA** sering digunakan karena sifatnya yang sederhana dan efisien. Namun, pendekatan ini rentan terhadap **tabrakan paket** karena tidak ada mekanisme sinkronisasi antarperangkat. Untuk itu, dua modulasi umum digunakan: **LoRa-CSS (Chirp Spread Spectrum)** yang bekerja pada kanal tunggal, dan **LR-FHSS (Long Range Frequency-Hopping Spread Spectrum)** yang memanfaatkan hopping frekuensi untuk menyebarkan interferensi dan meningkatkan kapasitas jaringan.

Analisis performa komunikasi uplink menjadi penting untuk memahami seberapa besar kemungkinan terjadinya keberhasilan transmisi dalam berbagai kondisi jaringan, termasuk jumlah perangkat aktif dan variasi payload. Oleh karena itu, diperlukan **pemodelan probabilistik** yang mampu memperkirakan **probabilitas sukses transmisi ($P(S)$)** serta simulasi untuk validasi terhadap kondisi nyata.

Penelitian ini berfokus pada pengembangan model analitis untuk menilai performa protokol LoRa-CSS dan LR-FHSS dalam komunikasi uplink DtS-IoT. Dengan validasi melalui **simulasi Monte Carlo**, diharapkan hasil analisis dapat menjadi landasan kuantitatif bagi pemilihan protokol yang tepat sesuai dengan kebutuhan aplikasi dan skala jaringan.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) yang semakin pesat, khususnya yang terkait dengan konektivitas langsung ke satelit (Direct-to-Satellite IoT atau DtS-IoT), muncul berbagai tantangan terkait kinerja dan efisiensi komunikasi satelit. Beberapa di antaranya adalah:

1. Bagaimana probabilitas tabrakan paket dapat dimodelkan secara analitis pada komunikasi uplink DtS-IoT yang tidak terkoordinasi, khususnya dengan protokol LoRa-CSS dan LR-FHSS?
2. Sejauh mana keakuratan model analitik dalam memprediksi keberhasilan transmisi, dan bagaimana hasil tersebut dapat divalidasi menggunakan simulasi Monte Carlo?
3. Apa pengaruh parameter sistem seperti ukuran payload, time-on-air, dan densitas perangkat terhadap performa komunikasi uplink dalam lingkungan satelit LEO?
4. Bagaimana mekanisme modulasi frekuensi hopping (LR-FHSS) dan chirp spread spectrum (LoRa-CSS) berbeda dalam mempertahankan performa jaringan saat jumlah perangkat IoT meningkat?
5. Pada skenario payload besar dan jaringan padat, protokol apa yang menunjukkan ketahanan lebih baik terhadap interferensi dan penurunan probabilitas sukses?
6. Apa saja implikasi desain jaringan DtS-IoT yang dapat ditarik dari hasil simulasi, khususnya terkait pemilihan protokol untuk skenario skalabilitas dan efisiensi spektrum?

1.3 Tujuan

1. Menganalisis kinerja komunikasi uplink dalam sistem DtS-IoT dengan pendekatan protokol ALOHA tanpa konfirmasi, menggunakan dua konfigurasi modulasi: LoRa-CSS (single-channel) dan LR-FHSS (frequency-hopping).

2. Memodelkan probabilitas tabrakan paket berdasarkan distribusi spasial perangkat IoT, lintasan satelit LEO, dan cakupan spot menggunakan pendekatan analitik dan validasi Monte Carlo.
3. Mengukur performa jaringan satelit seperti *probabilitas keberhasilan transmisi*, *throughput*, dan *latensi*, dengan mempertimbangkan pengaruh ukuran payload, durasi transmisi, dan jumlah perangkat aktif.
4. Membandingkan efektivitas LoRa-CSS dan LR-FHSS dalam berbagai kondisi jaringan, termasuk analisis kompleksitas sistem, kapasitas uplink, serta ketahanan terhadap interferensi.
5. Memberikan rekomendasi penerapan protokol uplink yang optimal berdasarkan karakteristik aplikasi IoT, skala jaringan, dan efisiensi spektrum

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Skop komunikasi hanya fokus pada uplink dari perangkat IoT ke satelit dalam sistem Direct-to-Satellite (DtS-IoT), tanpa mempertimbangkan jalur downlink atau proses sinkronisasi.
2. Model komunikasi menggunakan protokol ALOHA tak terkoordinasi, dengan dua pendekatan modulasi utama: LoRa-CSS dalam kanal tunggal dan LR-FHSS berbasis frekuensi hopping.
3. Validasi dilakukan menggunakan simulasi Monte Carlo, berdasarkan distribusi spasial perangkat (Poisson Point Process) dan asumsi orbit LEO dengan cakupan spot statis.
4. Faktor yang diuji terbatas pada probabilitas tabrakan dan keberhasilan transmisi, menggunakan parameter payload, time-on-air, dan jumlah interferer sebagai variabel utama.
5. Simulasi dilakukan dalam lingkungan MATLAB, dengan fokus pada model probabilistik dan performa protokol, tanpa integrasi langsung ke simulasi fisik seperti NS2 atau analisis kanal riil seperti Doppler dan fading.
6. Analisis difokuskan pada pengaruh ukuran payload dan skala jaringan, tanpa memasukkan dinamika multi-beam, sinkronisasi lintas node, atau adaptasi rate data secara otomatis.

1.5 Metodologi

1. Pemodelan Sistem Komunikasi Uplink
Merancang sistem komunikasi DtS-IoT dengan pendekatan protokol ALOHA tak terkoordinasi, menggunakan modulasi LoRa-CSS (kanal tunggal) dan LR-FHSS (hopping frekuensi). Model mempertimbangkan distribusi perangkat IoT secara spasial serta lintasan satelit orbit rendah.
2. Formulasi Model Probabilitas Keberhasilan ($P(S)$)
Mengembangkan model analitik untuk menghitung probabilitas sukses transmisi tanpa tabrakan berdasarkan durasi transmisi (time-on-air), area cakupan satelit, dan densitas perangkat.
3. Kategorisasi Payload dan Parameter Uji
Payload dibagi ke dalam kategori kecil hingga ekstrem, dengan variasi ukuran dari 10 hingga 200 byte. Parameter lainnya mencakup kecepatan satelit, bentuk spot, dan jumlah kanal untuk hopping.
4. Simulasi Monte Carlo
Melakukan simulasi menggunakan MATLAB untuk memvalidasi model analitik dengan pendekatan acak terhadap waktu transmisi dan posisi perangkat. Hasil simulasi dibandingkan dengan kurva analitik untuk mengevaluasi akurasi model.
5. Analisis Komparatif Protokol
Mengevaluasi dan membandingkan performa LoRa-CSS dan LR-FHSS pada berbagai skenario jumlah perangkat aktif, ukuran payload, dan kompleksitas sistem, berdasarkan output $P(S)$ dari simulasi.
6. Interpretasi Hasil dan Rekomendasi Sistem
Menarik kesimpulan dari hasil analisis untuk menentukan protokol uplink yang paling sesuai dengan karakteristik jaringan, kebutuhan aplikasi, dan efisiensi spektrum

1.6 Rencana Kegiatan

Kegiatan yang direncanakan untuk mendukung penelitian ini adalah:

1) Studi Literatur

Tahap ini bertujuan untuk mencari, mempelajari, dan memahami materi atau referensi terkait permasalahan yang terdapat dalam tugas akhir ini baik dari buku, jurnal ilmiah atau laporan yang sudah ada sebelumnya.

2) Pengumpulan data

Sistem yang telah dibuat diuji sesuai dengan parameter-parameter yang telah ditentukan dan dilakukan pengumpulan data untuk dianalisis.

3) Identifikasi Masalah

Kegiatan ini melakukan mengidentifikasi masalah yang akan diangkat untuk penelitian, yaitu perbandingan performansi jaringan *Direct-to-Satellite Internet of Things (DtS-IoT)*

4) Pengujian Hasil Penelitian

Pengujian dilakukan terhadap sistem yang telah dibuat untuk mengetahui hasil dari perbandingan performansi jaringan *Direct-to-Satellite Internet of Things (DtS-IoT)*

5) Penulisan Laporan

Hasil yang sudah dianalisa maupun dievaluasi selanjutnya dituliskan dan didokumentasikan kedalam bentuk laporan Tugas Akhir dengan harapan dapat dikembangkan lagi di waktu yang akan datang.