

2022 年度

早稲田大学大学院基幹理工学研究科情報理工・情報通信専攻 修士論文

非地上系ネットワークにおける NOMA・
PDMA の適用に関する研究

立川 航

(5121F058-5)

提出日：2023.1.23

指導教員：嶋本 薫 教授

研究指導名：ワイヤレスアクセス研究

目次

1. 序論-----	p.3
1.1 研究背景-----	p.3
1.2 研究目的-----	p.5
1.3 研究概要-----	p.5
2. 関連技術-----	p.7
2.1 非地上系ネットワーク-----	p.7
2.1.1 衛星通信の概要-----	p.7
2.1.2 衛星通信の区分-----	p.8
2.1.3 低軌道衛星コンステレーション-----	p.9
2.1.4 HAPS-----	p.12
2.1.5 非地上系ネットワークにおける光通信の適用-----	p.14
2.2 多重アクセス方式-----	p.15
2.2.1 OMA-----	p.15
2.2.2 NOMA-----	p.16
2.2.3 PDMA-----	p.19
2.2.4 OTFS-----	p.20
3. 地上-HAPS 間アップリンク通信における PDMA の適用に関する研究---	p.23
3.1 概要・研究背景-----	p.23
3.2 地上間-HAPS 間のチャンネルモデル-----	p.24
3.2.1 光-----	p.24
3.2.2 ミリ波-----	p.28
3.3 システムモデル-----	p.34
3.3.1 通信手順-----	p.34
3.3.2 光/ミリ波切り替え-----	p.35
3.3.3 PDMA と NOMA の適用-----	p.36
3.3.4 電力制御方式-----	p.39
3.4 結果・考察-----	p.42
3.4.1 シミュレーション手法・条件-----	p.42
3.4.2 BER-----	p.44
3.4.3 通信レート-----	p.46
3.4.4 フェアネスインデックス-----	p.48

3.4.5	電力制御-----	p.50
3.4.6	小結論-----	p.52
4.	衛星間通信における NOMA の適用に関する研究-----	p.55
4.1	概要・研究背景-----	p.55
4.2	衛星間通信におけるチャネルモデル-----	p.56
4.2.1	低軌道衛星コンステレーションのモデル-----	p.56
4.2.2	チャネル係数-----	p.57
4.2.3	ドップラーシフト-----	p.57
4.3	NOMA を適用した衛星間通信システムのシステムモデル-----	p.58
4.3.1	システムの概要-----	p.58
4.3.2	1 番目のタイムスロットにおける理論式 (アップリンク NOMA) -----	p.59
4.3.3	2 番目のタイムスロットにおける理論式 (ダウンリンク NOMA) -----	p.60
4.3.4	各ルートの通信レート-----	p.61
4.3.5	電力制御方式-----	p.61
4.4	結果・考察-----	p.63
4.4.1	シミュレーション条件-----	p.63
4.4.2	最大送信電力-通信レート, スループットに関するシミュレーション---	p.64
4.4.3	衛星 1 周期における BER 及び通信レート-----	p.66
4.4.4	電力制御方式に関するシミュレーション-----	p.67
4.5	小結論-----	p.70
5.	周回衛星を用いたコンステレーションにおける NOMA の適用に関する研究---	p.72
5.1	概要・研究背景-----	p.72
5.2	システムモデル-----	p.73
5.2.1	コンステレーション-----	p.73
5.2.2	通信手順-----	p.74
5.2.3	NOMA におけるスケジューリング・電力制御方式-----	p.77
5.3	結果・考察-----	p.79
5.3.1	シミュレーション条件-----	p.79
5.3.2	LEO-MEO 間通信における NOMA の通信性能-----	p.80
5.3.3	提案方式における end-to-end の通信性能-----	p.82
5.4	小結論-----	p.89
6.	結論-----	p.91
	謝辞・業績・参考文献-----	p.93

1. 序論

1.1 研究背景

近年非地上系ネットワーク（NTN, Non-Terrestrial Network）に関する研究が盛んにおこなわれている[1][2][3]. 非地上系ネットワークとは, 図 1.1 に示したような, 静止軌道衛星(GEO, Geostationary Earth Orbit), 中軌道衛星(MEO, Medium Earth Orbit), 低軌道衛星(LEO, Low Earth Orbit), HAPS(High Altitude Platform Station), UAV(Unmanned aerial vehicle)等を組み合わせたネットワークを指す. 非地上系ネットワークの利点としては, 通信の広域性, 回線設計の柔軟性, 災害時の可用性等が挙げられる. 非地上系ネットワークを利用した様々なユースケースが提案されているが, それらは主に 3 つに大別される. 第 1 に, 災害時の臨時ネットワークとしての利用である. 地震等の災害が発生し, 基地局の倒壊, ケーブルの切断, 停電等が発生した場合, 地上のネットワークは利用できなくなる. 2011 年に東日本大震災が発生した際には合計約 2 万 9 千局の移動通信基地局が停止した[4]. 一方で非地上系ネットワークは受信側の端末が無事であれば利用可能であるため, 災害時に稼働または派遣するネットワークとしての検討が進められている. また基地局が無事の場合でも災害時には被災者間の情報検索や安否確認, 避難要請等によりトラフィックが平常時よりも大幅に増加するため, 地上ネットワークだけでは対応しきれず輻輳が発生してしまう. 非地上系ネットワークも併せてトラフィックを分散させる仕組みを整えることで災害時の情報共有や救護を円滑に進めることができる. 第 2 に, 平常時における地上ネットワークのトラフィックを代替するネットワークとしての利用である. 近年第 5 世代移動通信システム (5G) の導入, IoT を始めとする様々なデジタル端末の社会実装, 医療・産業等の様々な分野におけるデジタル技術の活用等によりトラフィック量が飛躍的

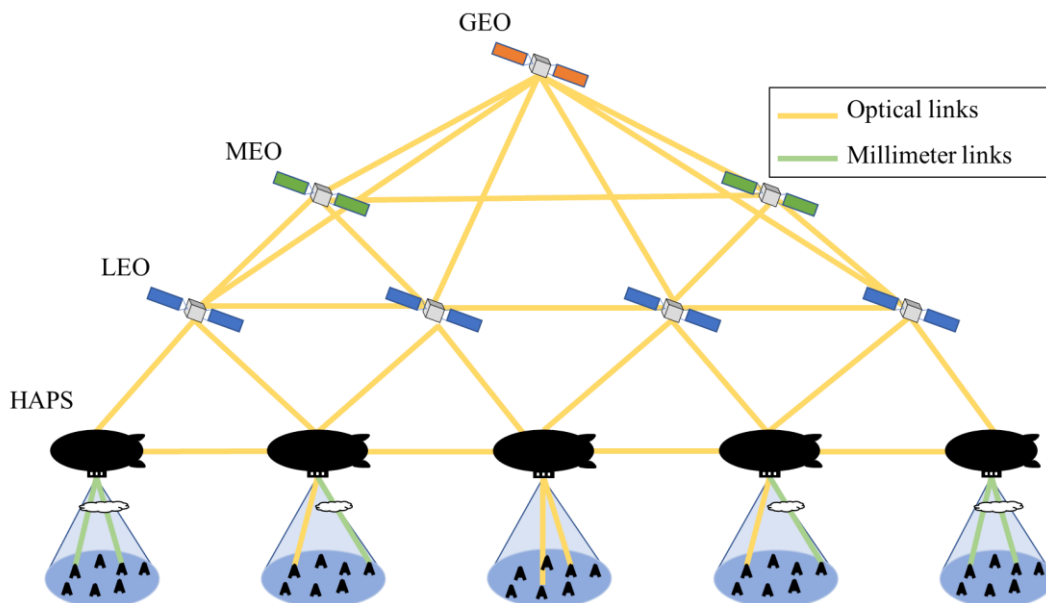


図 1.1 非地上系ネットワークの概略図

に増加しており、地上ネットワークの帯域を逼迫させている[5]。そのため遅延時間、通信精度等の通信要件が比較的低いパケットを衛星ネットワークに回すことで、地上ネットワークの負荷分散を行うことができる。従来は都市部のデータセンタを中心とした集権型のネットワークが運用されてきたが、非地上系ネットワークや地方のデータセンタも含めた分散型ネットワークの構築に関する検討が Beyond 5G に向けて進められている[6]。第3に、山間部や発展途上国等の通信インフラが整っていない地域における利用である。非地上系ネットワークは地上側の送信基地局を必要とせず、受信側の端末さえあれば利用することができる。そのため地理的制約、政治的制約等に捉われず通信を提供することができ、山間部や離島、過疎地域、発展途上国等における利用が検討されている。

ここまで述べたように、非地上系ネットワークには様々な利点があり、災害時にも使える通信網の確保、地上の通信帯域の逼迫、デジタルデバイドといった多様な社会課題を解決する可能性を秘めている。一方で非地上系ネットワークの弱点としては、地上系ネットワークと比較した遅延時間の長さが挙げられる[7]。地上ネットワークにおけるバックボーン回線の距離や基地局-ユーザ間の距離と比較すると、非地上系ネットワークにおけるリンクの距離、例えば衛星と地上局の距離や衛星間の距離は大幅に長くなる。よって非地上系ネットワークは遅延時間が長くなる。この遅延時間が非地上系ネットワークの普及を妨げる一因となっている。そのため非地上系ネットワークにおける遅延時間や通信容量を改善し、5G や Beyond 5G における通信要件に近づけることによって、実現可能なユースケースの幅を広げていくことが重要であると考えられる。例えば先述した災害時の臨時回線におけるユースケースについて、通信容量を大きくすることができれば、災害時に行政機関や避難所、一部の企業に限らず一般の人でも利用可能なネットワークとしての社会実装につなげることができる。また平常時における地上ネットワークの代替としてのユースケースにおいて、非地上系ネットワークの遅延時間や通信容量を改善し、対応できるサービスの幅を広げることで、より地上ネットワークの代替としての価値を高めることができる。したがって多重アクセス方式、ルーティング方式、ハンドオーバー方式等多面的な研究を行い、非地上系ネットワークにおける通信性能を改善する手法を検討していく必要があるといえる。

次に本論文で題材として取り上げる多重アクセス方式である NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) と PDMA (Power Level Division Multiple Access) について述べる。NOMA とは電力領域において複数の信号を多重化する通信方式であり、5G においても採用されている。同一の時間・周波数上で複数の信号を送信するため、周波数利用効率が大幅に改善する[8]。PDMA は NOMA と同様に電力領域における複数の信号の多重化を実装しつつ、各ユーザの電力レベルを周期的に切り替える通信方式である[9]。NOMA では周波数利用効率の改善によりスループットや遅延時間等は従来の OMA(Orthogonal Multiple Access)に比べて大幅に改善する。一方受信側における信号の復号を成功させるためには、複数のユーザの受信電力の間に一定の差をつける必要がある。そのため1つの通信の中で受信電力の大きいユーザと小さいユーザ、即ち通信レートの大きいユーザと小さ

いユーザが生じてしまい、ユーザ間の公平性の観点から問題がある。PDMA では各ユーザの電力レベルを周期的に切り替えることで、各ユーザを各電力レベルに均等に割り当て、ユーザ間の公平性を確保することができる。

NOMA の非地上系ネットワークへの適用については衛星-地上間通信では多くの先行研究があるが[10][11]、衛星間、HAPS 間、衛星-HAPS 間、HAPS-地上間等その他の領域では検討が進められていない。また PDMA は静止軌道衛星-地上間については検討されているが[42]、その他の領域では検討されていない。非地上系ネットワークでは、領域によってチャンネルモデル、大気減衰、フェージング等の条件が大きく変動するため、領域毎に検討を進めていく必要がある。

1.2 研究目的

非地上系ネットワークの弱点は伝搬距離の長さに起因する遅延時間の大きさであるといえる。この課題を解消するために、本論文では非地上系ネットワークにおける多重アクセス方式に着目し、通信精度やユーザ間の公平性を確保しつつ、遅延時間を抑制する手法について探求する。具体的には電力領域において複数の信号を多重化する NOMA 及び PDMA について取り上げる。非地上系ネットワークにおける NOMA 及び PDMA の活用方法について、通信手順、割当方式、ルーティング方式、電力制御方式等を踏まえて検討を行い、新しい通信システムを提案する。通信精度、通信レート、フェアネスインデックスといったシステムの性能をシミュレーションにより解析し、従来の方式と比較する。

また図 1.1 に示した通り、非地上系ネットワークは多層的なネットワークであり、チャンネルモデル等の特性はレイヤ毎に大きく異なる。よってレイヤ毎、またそれぞれのレイヤ間の通信について各領域の特性を踏まえた上で個別に検討を進めていく必要がある。本論文では地上-HAPS 間、低軌道衛星間、低軌道衛星-中軌道衛星間の 3 つの領域に着目し、各領域における多重アクセス方式について検討する。各領域について個別にシステム設計、チャンネルモデルの策定、シミュレーション、解析を行う。それぞれの結果について次章以降で述べる。

1.3 研究概要

1.2 において述べたように、本論文では地上-HAPS 間、低軌道衛星間、低軌道衛星-中軌道衛星間の 3 つの領域に着目し、各領域における多重アクセス方式について検討を行う。各領域における研究の概要は以下の通りである。また、取り組んだ 3 つの領域について図 1.2 の①～③に示す。

第 1 に、地上-HAPS 間の通信については「地上-HAPS 間アップリンク通信における PDMA の適用に関する研究」と題した研究を行う。複数の地上局から 1 台の HAPS に向けてアップリンクで通信を行う環境を想定し、PDMA を適用したシステムの提案及び性能の解析を行う。本研究で提案するシステムには 3 つの特徴がある。1 点目は、PDMA の適

用である。NOMA は電力領域において複数の信号を多重化することで周波数利用効率を大幅に改善するが、ユーザ間でデータレートに大きな差が発生してしまうため、公平性の観点から問題がある。一方で PDMA は周期的に各ユーザの電力レベルを切り替えることでユーザ間の公平性を確保する方式である。本研究では地上-HAPS 間アップリンク通信において NOMA と PDMA を適用した場合の通信手順及び割当方式についてそれぞれ検討し、通信精度、スループット、ユーザ間の公平性等の性能を解析する。2 点目は、光とミリ波のハイブリッドな切り替え方式の実装である。光通信は大気減衰や雲による減衰の影響を受けてしまうため、チャネルの状態が悪い場合は通信を行うことができない。そのため参照信号によってチャネルの状態を推定し、その結果に応じて光とミリ波を使い分ける仕組みを実装する。3 点目は、独自の電力制御方式の適用である。信号間の電力差を利用する NOMA, PDMA においては電力制御が非常に重要であり、システム性能に大きな影響を与える。そのためチャネル状態の差を利用した独自の電力制御アルゴリズムについて提案し、従来の方式と性能を比較する。

第 2 に、低軌道衛星間の通信については「低軌道衛星間通信における NOMA の適用に関する研究」と題した研究を行う。複数の低軌道衛星から 1 台の中継衛星を介し、別グループの複数の低軌道衛星へデータを送信する環境を想定する。複数の低軌道衛星から中継衛星に向けた通信にアップリンク NOMA、中継衛星から複数の低軌道衛星へ向けた通信にダウンリンク NOMA を適用することで遅延時間の抑制及びスループットの向上を実現する。また衛星間距離が計算可能であることを利用した独自の電力制御アルゴリズムについても提案し、性能を検証する。

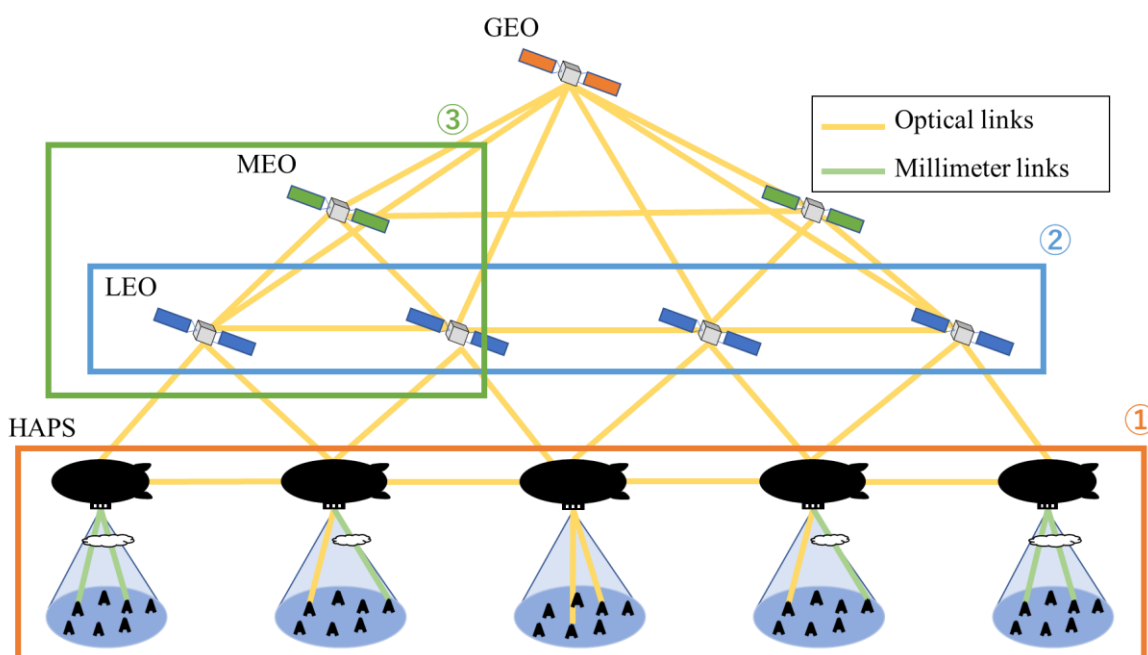


図 1.2 研究領域

第 3 に、低軌道衛星-中軌道衛星間の通信については、「周回衛星を用いたコンステレーションにおけるアップリンク NOMA の適用及びルーティング方式に関する研究」と題した研究を行う。低軌道衛星と中軌道衛星を組み合わせたネットワークを想定し、遅延時間の抑制とスループットの向上を目指し、独自のルーティング方式とアップリンク NOMA を適用した通信方式を提案する。ルーティング方式については、トラフィックを低軌道衛星と中軌道衛星に分散するルーティング方式を提案する。具体的には通信距離の長いパケットを中軌道衛星へ、短いパケットを低軌道衛星へ送ることでトラフィックを分散する。トラフィックが分散されることで、輻輳が発生する確率を低減できるため、遅延時間が抑制される。アップリンク NOMA については、複数の低軌道衛星から中軌道衛星に向けた通信に適用し、周波数利用効率の向上を図る。

2. 関連技術

2.1 非地上系ネットワーク

1.1 において述べたように、非地上系ネットワークとは、低軌道衛星、中軌道衛星、静止軌道衛星、HAPS、UAV 等を組み合わせたネットワークを指す。Beyond 5G において陸海空統合ネットワークを構築する構想もあり、非地上系ネットワーク、地上ネットワーク、海上及び海中のネットワーク等を連携した新しい通信方式が現在検討されている[6]。非地上系ネットワークの特徴としては通信の広域性、回線設計の柔軟性、災害時の可用性等が挙げられ、地上ネットワークの補完としての役割が強く期待されている。本節では非地上系ネットワークの中で、本論文で題材として取り扱う衛星通信と HAPS を用いた通信について詳しく述べる。

2.1.1 衛星通信の概要

衛星通信とは、宇宙空間に電波の送受信が可能な人工衛星を打ち上げ、衛星と地上間で通信を行う通信方式を指す。利用用途としては固定地点間の通信を行う固定衛星業務、航空機や船舶との通信を行う移動衛星業務、BS・CS 放送等の放送業務がある[5]。地震等の災害により地上局が使えない環境下においても、衛星局と地上の受信端末が無事であれば通信を利用することができるため、衛星通信は災害時向けの通信手段として活用されている。また地理的制約や政治的制約に捉われない通信を提供できることから、発展途上国や過疎地域、通信インフラの立てにくい山間部においても活用が期待されている。

図 2.1 に示す通り、衛星通信は地上から衛星に向けたアップリンク回線、衛星間の回線、衛星から地上に向けたダウンリンク回線の 3 つの回線から構成される。これらの内衛星間の回線は大気の影響を受けず、電波を跳ね返す反射物もほとんど存在しないため、大気減衰やフェージング、マルチパス等の影響を考慮する必要はない。一方で地上-衛星間の 2 種類の回線は大気減衰や天候、マルチパス、建物による遮蔽等の影響を強く受ける。

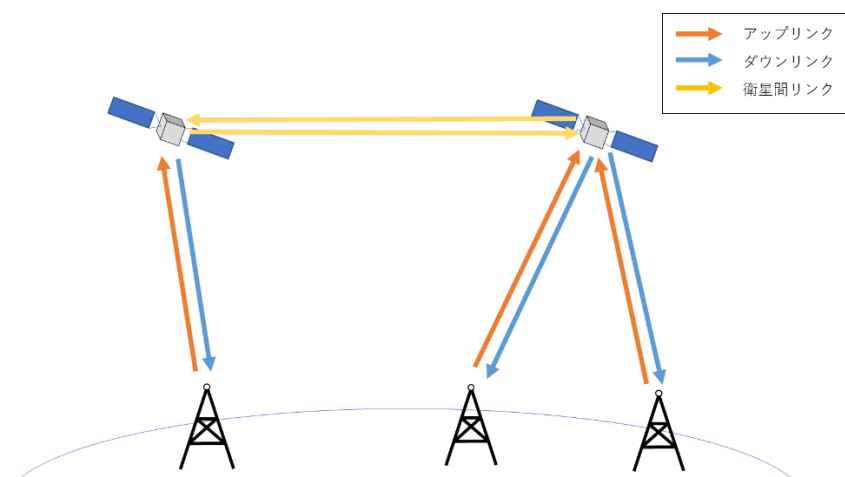


図 2.1 衛星通信の通信モデル

2.1.2 衛星通信の区分

人工衛星は高度に従い表 2.1 の通り分類される[12]。それぞれの衛星が異なる特徴を持っており、用途毎に使い分ける必要がある。静止軌道衛星（GEO）は赤道上空の高度 36,000 km に位置し、地球の自転と同じ周期で動く。静止軌道衛星の利点を 2 点あげる。1 点目は、地上局の制御が容易である点である。地上から見ると静止軌道衛星は静止して見えるため、地上局の仰角制御をする必要がなく、制御が容易である。2 点目は、カバレッジの広さである。静止軌道衛星は高度が高い分 1 基あたりのカバレッジが広く、理論上は 3 基で地球全体をカバーできる[12]。少ない台数で地理的制約や政治的制約に捉われないグローバルな通信を提供することができる。次に静止軌道衛星の弱点を 2 点あげる。1 点目は、遅延時間の長さである。地上-静止軌道衛星間の距離は、地上ネットワークにおける基地局-ユーザ間や低軌道衛星-地上局間と比較して大幅に長い[1]。伝播距離の長さに伴い遅延時間も長くなるため、リアルタイム性を必要とするアプリケーションには適していない。そのため静止軌道衛星は気象衛星や衛星放送等の遅延要件の緩い通信に用いられることが多い。2 点目は、小型化が難しい点である。静止軌道衛星-地上間の伝搬距離が長い分、より高い送信電力が必要となる。そのため大型の送信機やアンテナを人工衛星と地上局の双方に配備する必要があり、小型化が難しい。一方低軌道衛星は高度が低いため、より遅延時間の短い通信を提供することができる[12]。そのためモバイル通信等のリアルタイム要件の高いアプリケーションに適している。また高度が低い分 1 基当たりのカバレッジが狭いため、地球上のどこでも利用できる通信を実現するためには数十から数百基の衛星が必要である。さらに衛星が地上から見て相対的に高速に動くため、地上局の仰角制御やハンドオーバーが必要となる。また低軌道衛星は送信距離が短い分送信電力を低減することができる。そのため送信機及び衛星の小型化、低コスト化が可能であるため、民間企業等の参入も期待されている。

表 2.1 衛星の種類 [12]

	LEO	MEO	GEO
高度	160~2000 km	2000~36,000 km	36,000 km
遅延時間	短い	⇔	長い
送信電力	小さい	⇔	大きい
衛星数	数十~数百基	~10 基	~3 基
仰角制御	必要	必要	必要
コンステレーション の例	イリジウム, Starlink	O3b	インテルサット, イ ンマルサット

2.1.3 低軌道衛星コンステレーション

2.1.2 において述べた通り，低軌道衛星は 1 基あたりのカバレッジが狭いため，数十~数百基の衛星を繋いだネットワークによってグローバルな通信を実現する．このネットワークを低軌道衛星コンステレーションと呼ぶ．低軌道衛星コンステレーションでは複数の衛星軌道を設け，各軌道に複数の衛星を配置する．例えば Iridium という衛星コンステレーションの場合，6つの軌道を持ち，各軌道に 11 基の衛星を配置している．図 2.2 に示す通り，各衛星は同一軌道上の隣接衛星 2 基，隣接軌道上の隣接衛星 2 基との間に双方向の通信リンクを設ける．これらのリンクを利用したマルチホップ通信を行うことで，地理的に離れた 2 地点間の通信を実現する [13]．具体的には，まず地上の送信局から最寄りの衛星

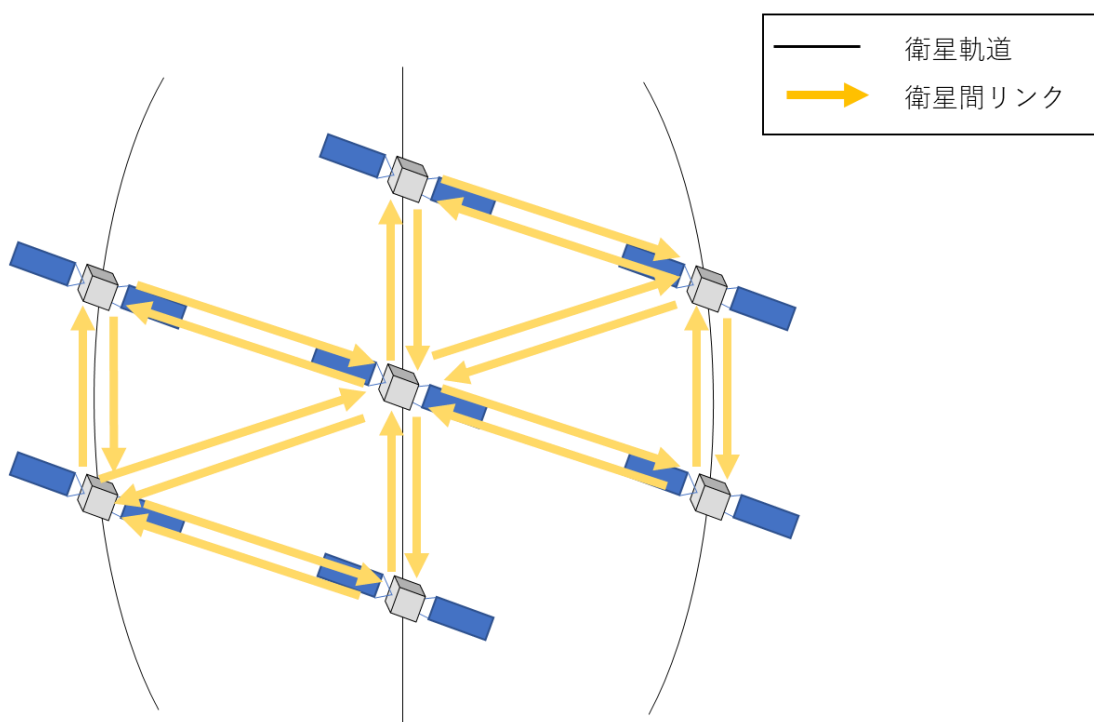


図 2.2 低軌道衛星コンステレーションにおける衛星間通信のモデル

局へデータを送信する。次に衛星間のリンクを介して地上の受信局の最寄りの衛星局へ送信する。最後に衛星局から地上の受信局へデータを送信することで通信を完了させる。低軌道衛星コンステレーションの特徴の1つとして、リンク故障に強い点を挙げる。ある1つの衛星間のリンクで故障または輻輳が発生した場合、迂回して他のリンクを使用することで通信路を確保することができる。一方低軌道衛星コンステレーションにおける課題としてドップラーシフトを挙げる。同一軌道の衛星間通信の場合、相対速度が0になるためドップラーシフトは発生しない。一方異なる軌道上の衛星間通信の場合、相対速度が発生するため、ドップラーシフトが発生する。特に反対方向に動いている軌道上の衛星間通信の場合、ドップラーシフトが大きくなるため、制御が難しくなる。

次に現在開発されているコンステレーションを表 2.2 に示す。従来は Iridium のように衛星数が 100 基以下のコンステレーションが開発されていたが、近年は Starlink や OneWeb をはじめとした衛星数が数百基~数千基に及ぶメガコンステレーションが建設されている[14]。メガコンステレーションでは衛星数の多さによる隙間のないカバレッジや低遅延な通信が提供可能であり、リアルタイム性の高い通信の実現が期待されている。また表 2.2 に示した通り、低軌道衛星の軌道には極軌道と傾斜軌道の2種類が存在する。極軌道は Iridium 等で採用されている軌道であり、古くから開発されてきた方式である。Iridium のコンステレーションを図 2.3 に示す。軌道傾斜が 90 度であり、極軌道の衛星は北極と南極の上空を通過するため、高緯度地域も含めて地球全域をカバーすることができる。一方で軌道の構造上北極・南極に近い高緯度地域では衛星が密となり、低緯度地域では疎となるため、公平性の観点から問題がある。また北半球・南半球共に人口が多い地域は低緯度~中緯度地域に集中しているため、高緯度地域に基地局が多い極軌道は効率性の観点からも問題がある。傾斜軌道は近年開発が進められている方式である。傾斜軌道の1つである NeLS コンステレーションを図 2.4 に示す。軌道傾斜は 30~60 度であり、北極・

表 2.2 開発済みの低軌道衛星コンステレーション[14][15] [16] [17] [18] [19] [20]

	Iridium Next	Oneweb	Telesat	LeoSat	Kuiper	Starlink
製造国	アメリカ	イギリス	カナダ	フランス	アメリカ	アメリカ
運用開始年	2017 年	2019 年	2018 年	2019 年	未定	2019 年
衛星数	66 基	648 基	188 基	108 基	3226 基	4400 基
高度	780 km	1200 km	1000 km	1400 km	-	1200 km
軌道の種類	極軌道	極軌道	極軌道, 傾斜軌道	極軌道, 傾斜軌道	-	極軌道, 傾斜軌道
周波数帯	Ku, Ka	Ku, Ka	Ka, 光	Ka, 光	Ka, V	Ku, Ka, V

南極付近には衛星が配置されていないため、高緯度地域には通信を提供することができない。一方低緯度～中緯度地域においては衛星が均等に配置されているため、効率性に優れた方式であるといえる[14]。また傾斜軌道の課題の1つとしてドップラーシフトが挙げられる。ドップラーシフトは衛星間の相対速度により発生するため、極軌道・傾斜軌道共に軌道内衛星間では発生しない。軌道間衛星については、極軌道は隣り合う軌道が同じ方向に動く場合は相対速度が小さくなるためドップラーシフトは小さくなる。反対方向に動く場合は相対速度が大きくなるため、ドップラーシフトも大きくなる。傾斜軌道は図 2.4 に示した通り、衛星が軌道上を1周する中で、多くの軌道と交差している。交差する軌道上の衛星との間では相対速度が大きくなるためドップラーシフトも大きくなる。またハンドオーバーも頻繁に発生するため、衛星の位置によっては軌道間リンクが使用できない場合もある。よって制御の難度が高い方式であるといえる。以上述べたように、極軌道、傾斜軌道はそれぞれ北極・南極地域における可用性、公平性、効率性、ドップラーシフトの大きさ等の異なる特徴を持っている。先述したメガコンステレーションでは極軌道と傾斜軌道を組み合わせた方式が Telesat や LeoSat 等により採用されており、2種類の軌道を使い分ける方法等、今後の動向が注目される[17][18]

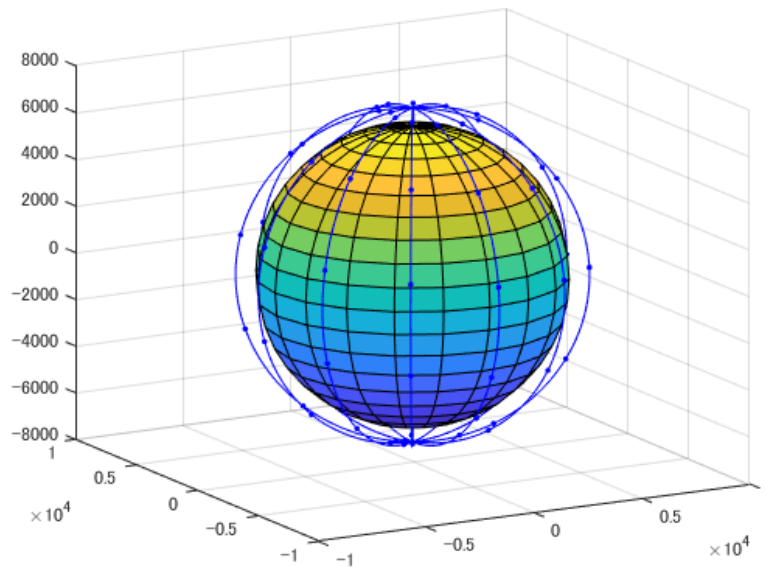


図 2.3 Iridium のコンステレーション

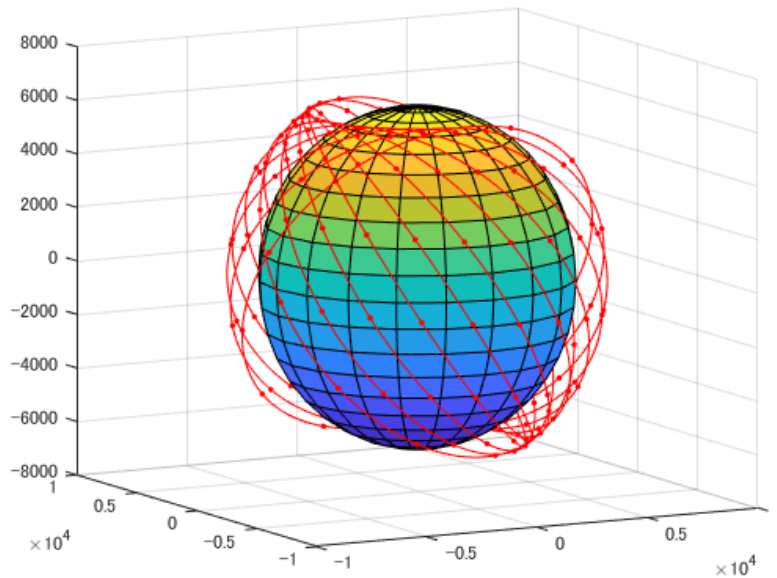


図 2.4 NeLS のコンステレーション

2.1.4 HAPS

HAPS (High Altitude Platform, 成層圏プラットフォーム) とは高度 20~50 km の成層圏に位置する空中基地局である [21]. 非地上系ネットワークにおいては地上のエンドユーザとの直接通信や衛星間の通信を中継する役割が期待されている. まず衛星と共通する HAPS の長所として, 災害耐性の高さが挙げられる. 災害等により地上基地局が使用できない場合であっても, 衛星と同じように HAPS は地上の受信端末が無事であれば利用することができる. また地理的制約や政治的制約に捉われない通信を提供できる点も, 衛星と同じく長所であるといえる. 次に衛星通信と比較した HAPS の長所を 3 点挙げる. 1 点目に, 可動性・機動性に優れている点を挙げる. 衛星は地上から見た相対的な位置が変化しない静止軌道衛星, 既定の軌道を一定速度で回る低軌道衛星といったように, 地上からの指示で自由に基地局を動かすことができない. 一方 HAPS は風の影響を受ける等の制約はあるが, 機体を動かすことができる. そのため被災地への迅速な基地局の派遣, 基地局の移動によるエリア全体の最適化等を実施することができ, 可動性・機動性に優れた方式であるといえる [21]. 2 点目に, 衛星と比較して遅延時間が短い点を挙げる. 2.1.2 において述べたように, 最も高度が低い低軌道衛星の高度は 160~2000 km である. HAPS は低軌道衛星よりもさらに高度が低いため, 伝播距離が短く, より高速な通信を提供することができる. 3 点目に, 地上ネットワークとの相互運用性の高さを挙げる. 衛星は送信電力・受信電力の大きさから専用の衛星携帯電話が必要であり, 通常の携帯端末では回線に直接接続することはできない. 一方 HAPS は LTE や 5G NR に接続が可能となるように現在実証実験及び設計が進められている [22]. そのため携帯電話から直接接続することができ,

利便性に優れている。また地上基地局との相互運用性の高さを活かし、通信需要の大きいエリアに HAPS を派遣することで負荷分散を実施することも可能である。一方 HAPS には大別して3点の課題がある。1点目は機体製造の難しさである。HAPS は無人飛行による運用が想定されており、長期間運用可能かつ基地局を搭載可能な機体製造、航空機等との衝突を回避する自立航行システムの構築等の様々な課題がある。2点目は天候・風等に大きく左右される点である。HAPS は成層圏に位置するため天候や風等の影響を強く受ける。通信リンクは周波数帯が高いほど天候の影響を受けるため、天候の影響を考慮した伝播モデルの策定、それらを考慮した上で通信品質を確保する方式の実装等を行い、安定的にサービスを提供する仕組みを構築する必要がある。また風により機体が揺らされる場合もあるため、その影響を緩和する仕組みも必要である。3点目に制度上の課題である。HAPS は国境を越えて通信を提供することを目的として開発が進められているが、古くから運用されてきた衛星に比べると各国の法整備が進んでいない。そのため国際標準、国際的な運用ルールの策定や、各国における法整備を進める必要がある。例えば日本においては電波法等の通信に関する法律に加え、航空法等の法律について見直しが必要である。以上述べたように、HAPS には様々な長所及び短所があり、通信のダイバーシティ性の確保、災害時の通信網の確保、地上ネットワークの負荷分散等の役割を果たす新しいネットワークとして、今後も検討を進めていく必要がある。

次に HAPS の形状について述べる。HAPS には様々な形状があり、各社が検討を進めているが、それらは気球型と回転翼型に大別される[22]。気球型、回転翼型それぞれのモデルを図 2.5 に示す。気球型は、気球・バルーンに基地局を搭載する方式である。大型化がしやすく大きい通信基地局を搭載可能である。一方機体の制御や移動が難しく、風速や衝突する可能性のある物体を把握した上で事前にぶつからないように位置を調整する必要がある。一方回転翼型は、太陽光パネルを搭載した小型の飛行船である。特徴としては、機動性が高く、自由に機体を移動させることができるため、被災地への派遣やエリアの状況に応じた機体の位置の最適化等を行うことができる。また旋回飛行により機体の位置を固定することもできる。弱点としては、連続航行時間の短さを挙げる。太陽光パネルにより発電を行うため環境に与える負荷が小さい一方、天候等の影響を受けず長期航行を可能とする電源や蓄電池の開発が課題となっている[23]。

次に現在開発されている HAPS について述べる。2013 年に立ち上げられた Google の Loon は気球型の HAPS を開発するプロジェクトである[24]。地方や遠隔地にインターネット接続環境を提供することを目的とし、高度 18 km に気球型の HAPS を配置し、3G に匹敵する最大速度のネットワークを構築する。NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, 米国海洋大気庁) から得られる風速のデータを基に、18~25 km の成層圏の各高度における風速を見積もる。その結果を基に高度を制御することで気球の緯度・経度を制御する方式を実装している。Facebook も 2014 年に高度 18~27 km にヘリウム気球型の HAPS を打ち上げた[21]。ドコモは Airbus と連携して回転翼型の HAPS を開発し、

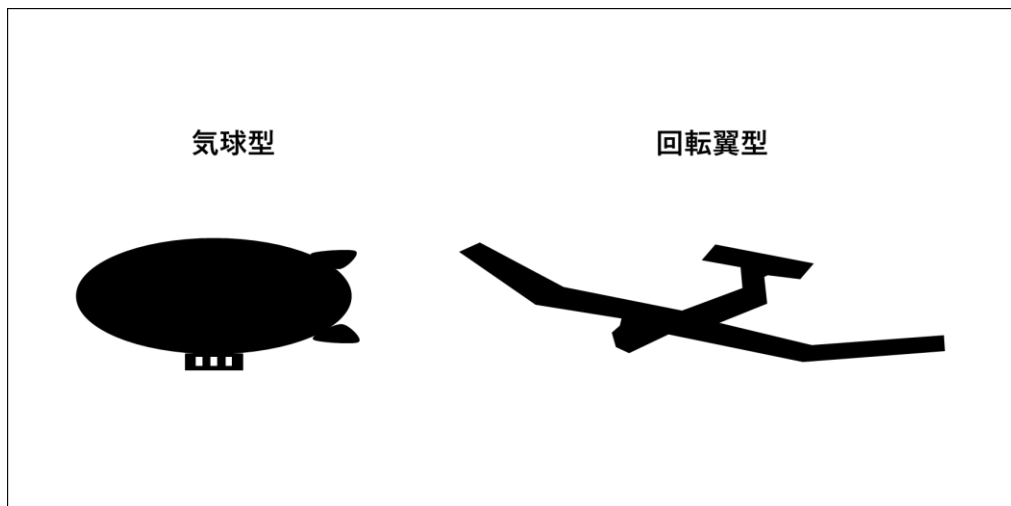


図 2.5 気球型/回転翼型の HAPS

2018 年に実証実験を行った。18 日間の航行を行い、HAPS-携帯電話間の通信を成功させ、伝送距離は最大 140 km に達した[25]。ソフトバンク傘下の HAPS Mobile は HAWK30 という回転翼型の HAPS を開発した[26]。全長 78 m であり、翼に取り付けられたソーラーパネルと 10 個のプロペラにより、平均時速 110 km で航行することができる。また数か月に及ぶ飛行が可能である。

2.1.5 非地上系ネットワークにおける光通信の適用

近年非地上系ネットワークにおける光通信 (FSO, Free Space Optics) の適用が注目されている。光通信の利点を 4 点あげる[27]。第 1 に、広帯域性により高速な通信が可能である。電波よりも広い帯域幅を利用することができるため、スループットを高めることができる。第 2 に、送信機の小型化が可能である。光通信は電波よりも送信電力を小さくすることができるため、送信機の小型化や消費電力の低減が可能である。搭載する送信機の小型化により、衛星や HAPS も小型化することができ、コストの低減にもつながる。第 3 に、秘匿性の高い通信が可能である。光通信は利得が非常に高く、ビーム幅が狭いため、盗聴や干渉等の影響を受ける可能性が低い。第 4 に、電波と異なり免許が不要な点である。電波の場合周波数毎に免許が必要となるため、国境をまたいで通信を提供する非地上系ネットワークでは周波数の国際調整や許認可のプロセスが必要となる。光通信の場合はこのプロセスが不要となる。一方光通信の弱点を 2 点挙げる。第 1 に、光やテラヘルツ波等の高周波帯域は大気減衰や雲による減衰の影響を受けやすい。そのため天候等のチャンネルの状態によっては通信を行うことができない[27][28]。第 2 に、指向制御の難しさである。光は指向性が高い分ビーム幅が非常に狭くなる。そのため正確な指向・制御・追尾技術が必要であり、非地上系ネットワークにおける光通信において大きな課題となっている[28]。第 1 の課題については、伝播路に大気や雲が多く影響を受けやすい衛星-地上間通信や

HAPS-地上間通信において特に大きな課題となっている。対策としては地上の受信局を複数設置するサイトダイバーシティ方式，衛星-地上間の通信を航空機や HAPS で中継する方式，天候に応じて光とミリ波を切り替える方式等が提案されている[29][30][31]。一方衛星間通信は宇宙空間において行われるため，大気や雲等の影響を受けにくく，チャンネル状態に関わらず光リンクを使用することができる。そのため非地上系ネットワークにおける光通信の適用については衛星間通信への適用を中心に検討されており，多くの先行研究がある[7][33][34]。

2.2 多重アクセス方式

多重アクセス方式とは，ある特定の周波数を複数のユーザで分割して利用する技術である。本節では，研究の対象とする NOMA，PDMA に加え，従来利用されてきた OMA や，今後の利活用が期待されている OTFS について述べる。

2.2.1 OMA

OMA(Orthogonal Multiple Access, 直交多元接続)とは，1人1人のユーザに資源を直交的に割り当てる技術である。具体的な技術として，FDMA(Frequency Division Multiple Access, 周波数分割多元接続)，TDMA(Time Division Multiple Access, 時分割多重接続)，CDMA(Code Domain Multiple Access, 符号分割多元接続),OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, 直交波周波数分割多元接続)について説明する。FDMA は 1980 年代に普及した 1G のアナログ音声通話サービスに利用された方式である[35]。図 2.6 に示した通り，各ユーザに異なる搬送周波数を割り当てることによって信号を区別する。シンボル間干渉を防ぐために，各ユーザに割り当てたチャンネルの間にガードバンドを設置する[36]。TDMA は 2G において実装された技術であり，GSM や PDC といった規格がある[35]。時間毎に各チャンネルに割り当てるユーザを決め，各ユーザは決められた時間にデータを送信することで干渉を回避する。ユーザに割り当てる時間の単位をタイムスロットと呼ぶ。CDMA は 3G において利用された方式であり，W-CDMA と CDMA2000 という 2 つの規格がある[35]。CDMA ではスペクトル拡散技術を用い，各ユーザを識別する。具体的には，まず各ユーザに個別の拡散信号を割り当てる。各ユーザの信号と拡散信号を掛け合わせ信号をそれぞれ生成し，それらを同じチャンネル上で同時に送信する。受信側では各ユーザの拡散信号を用い逆拡散することで自身の信号を取り出す。OFDM は周波数軸上で互いに直交関係を有するサブキャリアを多重化して送信する方式である。FDMA に比べ高密度にユーザを配置することができるため，周波数利用効率が高くなる。

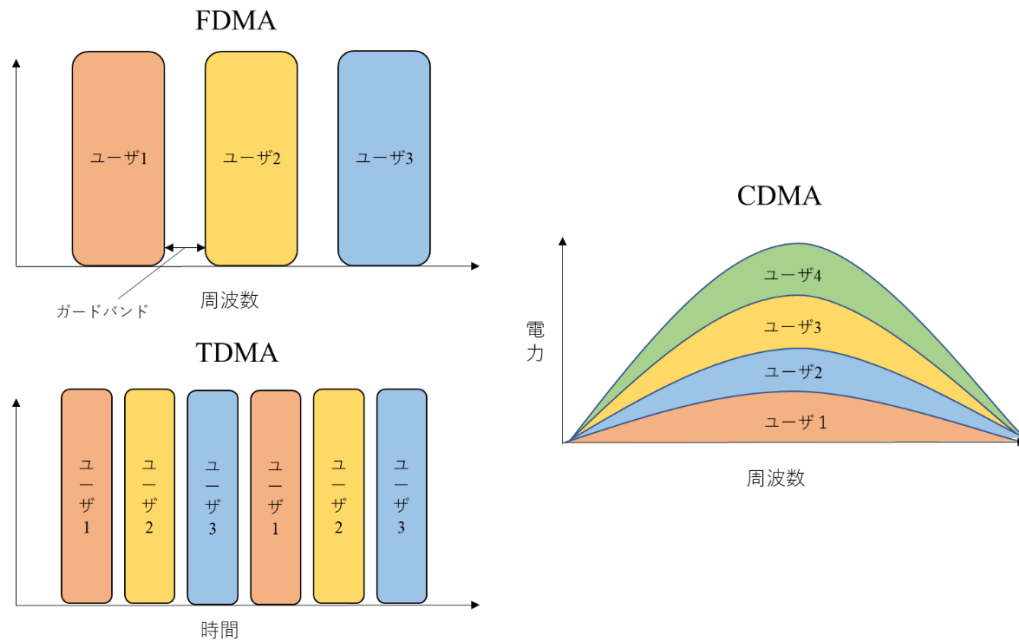


図 2.6 FDMA,TDMA,CDMA のモデル

2.2.2 NOMA

5G, IoT 等の普及, デジタル化の進展によりトラフィック量は増加し続けている. 2020 年 11 月時点では平均約 19.9 Tbps のトラフィックが日本国内で流通していたと推定されており, この値は前年比 56.7% 増である [5]. また発展途上国においてもインターネットインフラが急速に整備されており, 今後もトラフィック量は増加していくことが予想される. 対して利用可能な周波数帯域は有限であるため, より周波数を有効活用する技術が必要である. 2.2.1 において述べた OMA は, 周波数, 時間といった資源を直交的に割り当てることで混信を避ける方式であるが, この方式では達成可能な周波数利用効率に限界がある. そのため近年は資源を非直交的に割り当てる NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access, 非直交多元接続) が注目を集め, 5G においても実装されている [37]. NOMA では時間, 周波数といった資源を複数のユーザに割り当て, 電力領域またはコード領域において信号の多重化及び分離を行うことで通信を行う. 同じ時間軸, 周波数軸上で複数の信号を送信することができるため, OMA に比べて周波数利用効率が大幅に上昇する. また 5G, Beyond 5G において目標とされている超多接続, 超大容量, 超低遅延にも貢献することが期待されている [38].

NOMA の方式は, 電力領域の NOMA (Power Domain NOMA) とコード領域の NOMA (Code Domain NOMA) に大別される [38]. 電力領域の NOMA では, 各ユーザのチャンネル状態と復号する順番に応じて異なる送信電力を割り当て, 信号を送信する. 受信側では SIC (Successive Interference Cancellation) により受信電力が高い順に信号を復号する. コード領域の NOMA は CDMA を拡張した方式である. CDMA と同じように拡

散符号を各ユーザに割り当て、時間・周波数軸上で信号を多重化する。さらに拡散シーケンスを用い、各ユーザのゲインを異なる値に設定することができる[37]。本論文では電力領域の NOMA に絞って議論を行う。以降簡単化のため、「NOMA」は電力領域の NOMA を指すものとする。

次に NOMA の原理について説明する。簡単化のため、図 2.7 に示したように、2 台の送信局が 1 台の受信局に向けてデータを送信するアップリンク NOMA を想定して説明する。ユーザ 1 の方がユーザ 2 よりも基地局との間の伝搬距離が短い環境を想定し、ユーザ 1 の方がユーザ 2 よりも受信電力が大きくなるものとする。各ユーザは同一周波数を用い、同時に信号を送信する。先述したように、NOMA は受信電力の差を利用して受信側で復号を行うため、2 人のユーザの受信電力に差がつくように、各ユーザの送信電力を制御する

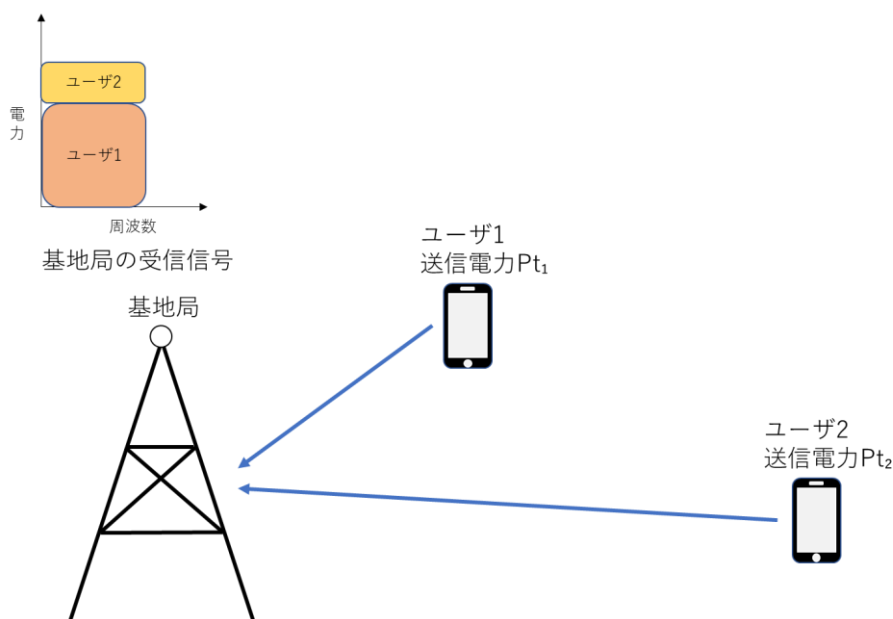


図 2.7 アップリンク NOMA の例

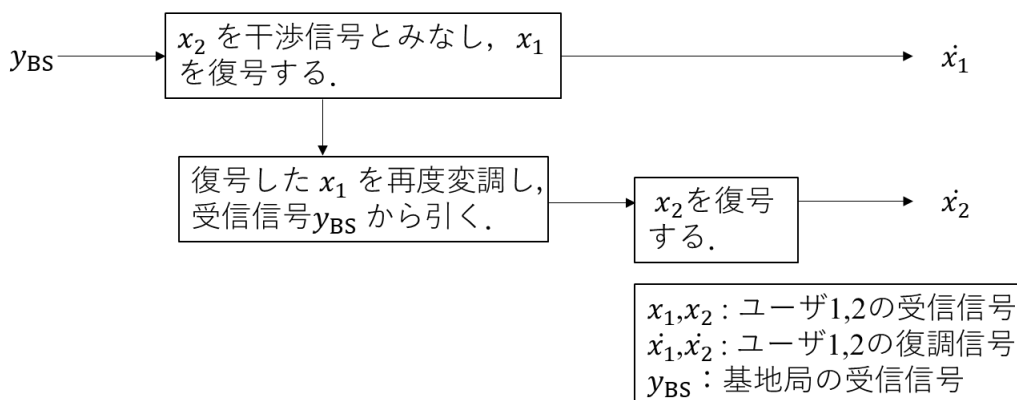


図 2.8 アップリンク NOMA における復号手順

必要がある。受信側で受信される信号は図 2.7 の左上の図のように、電力領域において複数の信号が多重化された信号になる。受信側では SIC により、各信号を分離することで復号を行う。具体的な復号の手順を図 2.8 に示す。まず受信電力の小さいユーザ 2 の信号を干渉信号とみなし、受信電力の大きいユーザ 1 の信号を復号する。次に復号したユーザ 1 の信号を再度変調し、元の受信信号から引くことでユーザ 1 の信号を除去する。最後にユーザ 1 の信号を除去した受信信号からユーザ 2 の信号を復号する。ユーザ数が 3 人以上の場合も同様に受信電力が大きいユーザから順に復号することで全ユーザの信号を復号する。またダウンリンクの場合も同様に、送信側で全ユーザに宛てた信号を多重化し、受信側の各ユーザは自身の信号が取り出せるまで SIC による信号の分離を繰り返すことで電力領域における多重化を実現することができる。ユーザ間の受信電力に差がつかない場合、受信電力の大きい信号を復号する際の干渉信号の電力が大きくなるため、受信電力の大きいユーザの通信精度が劣化する。また受信電力が大きいユーザの信号のビット誤りが受信電力の小さいユーザの復調にも波及するため、受信電力の小さいユーザの通信精度も劣化する。一方受信電力の大きいユーザに比べて受信電力の小さいユーザの受信電力を小さく設定しすぎた場合、受信電力の小さいユーザの信号を認識できず、通信精度が劣化する。そのため適切な電力制御を行うことが NOMA においては非常に重要であるといえる。また受信電力の大きさは通信レートにも反映されるため、NOMA では受信電力の大きいユーザと小さいユーザで通信レートにも大きな差ができてしまう。ダウンリンク NOMA における

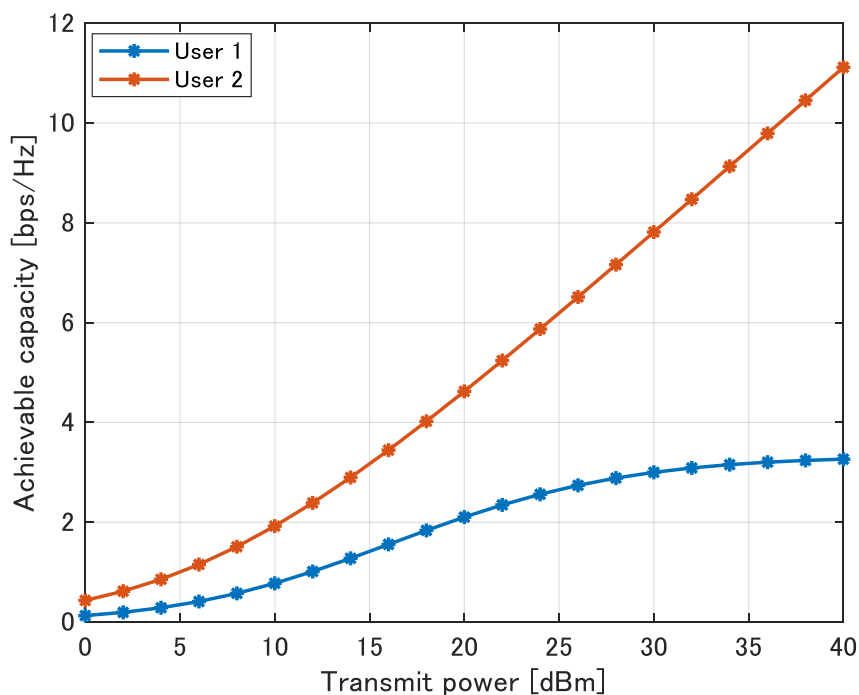


図 2.9 アップリンク NOMA における通信レートの差

通信レートのシミュレーション例を図 2.9 に示す。この結果からも分かる通り、ユーザ間の公平性の確保が NOMA における課題であるといえる。

次に NOMA の理論式について述べる。簡単化のため、図 2.7 に示した 2 ユーザアップリンク NOMA の場合の理論式について説明する。受信局の受信信号は次式より表される。

$$y_{Bs} = \sqrt{P_1}h_1x_1 + \sqrt{P_2}h_2x_2 + n \quad (2.1)$$

x_1, x_2 はユーザ 1,2 の送信信号, P_1, P_2 はユーザ 1,2 の送信電力, h_1, h_2 は受信局-ユーザ 1,2 間のチャネル係数, n は白色ガウス雑音 (AWGN) を指す。ユーザ 1,2 の SINR (Signal to Interference and Noise Ratio, 信号電力対雑音電力比) は次式より表される [39].

$$SINR_1 = \frac{P_1|h_1|^2}{P_2|h_2|^2 + \sigma_n^2} \quad (2.2)$$

$$SINR_2 = \frac{P_2|h_2|^2}{\sigma_n^2} \quad (2.3)$$

σ_n^2 は雑音電力を表す。各ユーザの通信容量は次式より表される [39].

$$R_1 = W \log_2(1 + SINR_1) \quad (2.4)$$

$$R_2 = W \log_2(1 + SINR_2) \quad (2.5)$$

W は帯域幅を表す。

2.2.3 PDMA

先述した通り、NOMA はユーザ間の受信電力の差により、ユーザ間の通信レートにも大きな差が生じてしまい、ユーザ間の公平性を確保することができない。PDMA は NOMA と同様の電力領域における信号の多重化を実装しつつ、各ユーザの電力レベルを周期的に切り替えることでユーザ間の公平性を確保する多重アクセス方式である。PDMA は 1992 年に提案された方式である [40]。提案された段階では信号を分離する SIC が導入されておらず、電力領域における信号の多重化のみが実装されていたが、本論文では PDMA に SIC の機能を付加した方式を対象とする。

次に PDMA の制御方式について具体的に説明する。PDMA では NOMA と同様に複数の信号を同一周波数、時間上で送信する。NOMA では基本的に電力レベルの切り替えは行わず、各ユーザは固定の電力レベルを使用する。チャネル状態が悪いユーザを低い電力レベルに配置し、チャネル状態が良いユーザを高い電力レベルに配置する方式が最も電力の利用効率が良く、多く用いられている [41]。一方 PDMA ではチャネル状態に関わらず、各ユーザの電力レベルを周期的に切り替える。4 ユーザで PDMA を実装した例を図 2.10 に示す。図 2.10 において、Station D はタイムスロット 1 では電力レベル 1 に割り当てられているが、タイムスロット 2 では電力レベル 2、タイムスロット 3 では電力レベル 3 と電力レベルが周期的に切り替わっている。各ユーザは前のタイムスロットよりも電力レベルが 1 段階上がるように制御される。また最も高い電力レベルまで達した場合は次のタイムスロットで最も低い電力レベルになるよう制御される。したがって各ユーザは均等に各電力

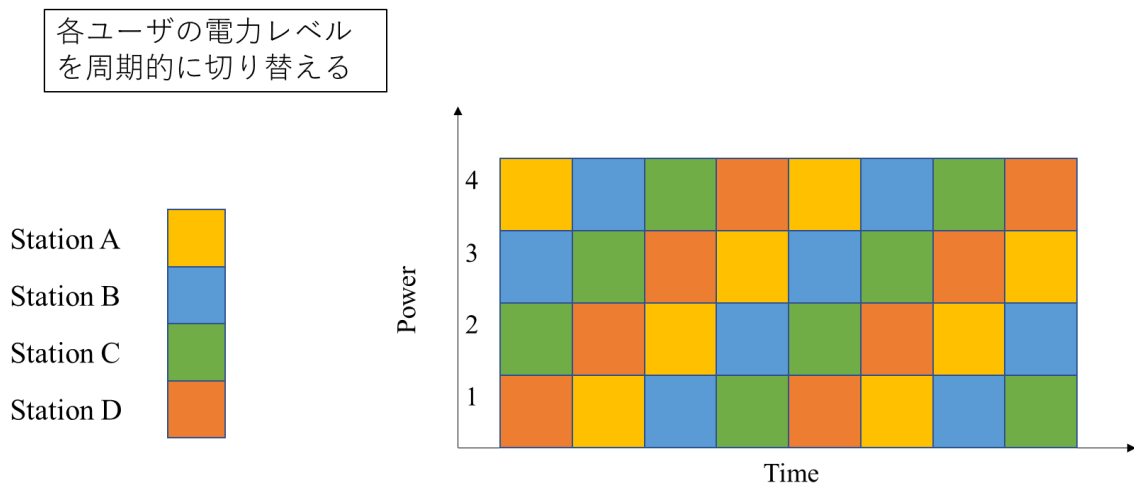


図 2.10 PDMA における割当の例

レベルに割り当てられる。電力レベルが高い場合の通信レートは高くなり、電力レベルが低い場合の通信レートは低くなる。よって各電力レベルに均等に割り当てられることで、各ユーザの平均通信レートは近い値になり、ユーザ間の公平性が確保される。

PDMA の非地上系ネットワークへの適用については、静止軌道-地上間の通信において先行研究がある[42]。しかし他の領域については研究されていない。

2.2.4 OTFS

OTFS (Orthogonal Time Frequency Space Modulation, 直交時間周波数空間変調) とは、従来用いられてきた時間・周波数領域ではなく、遅延・ドップラー領域を利用した多重アクセス方式である[43]。本論文では題材として用いないが、Beyond 5G において活用が期待されている非地上系ネットワークの新しい多重アクセス方式であるため、その概要を記載する。従来の OMA や NOMA, OFDM は時間・周波数領域において信号を識別する通信方式であり、マルチパスによる遅延波やドップラーシフトは円滑な通信を阻害する要因として捉えられてきた。OTFS はこの遅延波やドップラーシフトを逆に利用した方式であり、遅延・ドップラー領域において信号を識別する。詳細な通信手順、理論式については後述するが、OFDM を昇華させた方式でもあり、送受信側で時間-周波数領域と遅延・ドップラー領域間の変換を実装することで変復調を行う。利点としては、先述した遅延波、ドップラーシフトに対する耐性に加え、チャネルゲインが一定であることが挙げられる[43]。

OTFS では遅延-ドップラー領域で生成した信号を時間-周波数領域に変換するが、この時に信号が時間-周波数領域において CDMA のように拡散されるため、チャネルゲインが一定となる。さらに特定の周波数や時間において干渉波が発生した場合でも、信号が時間-周波数領域において拡散されているため、信号が受ける影響は小さく干渉に強い方式であるといえる。対して弱点としては、利用可能なユースケースが限られる点と、詳細なチャネル情報が必要な点が挙げられる。OTFS は遅延波やドップラーシフトを利用した方式である

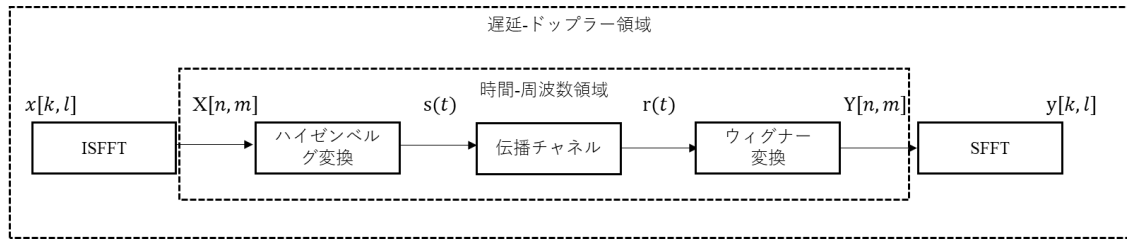


図 2.11 OTFS の変復調手順

ため、遅延波やドップラーシフトが生じない環境では利用できない。そのためドップラーシフトや遅延波の少ない屋内通信等では利用することができない。ドップラーシフトが大きいミリ波・テラヘルツ波などの高周波帯及び高速鉄道・衛星等の高モビリティ環境、V2X や移動体通信等のマルチパスが大きい環境に適した方式であるといえる[44]。チャンネル情報については、受信側でチャンネル情報を利用して復号を行うため、ドップラーシフトや遅延波等の詳細なチャンネル情報が必要となる。そのため正確なチャンネル推定が必要であり、普及を促すためにはより可用性の高い方式を探求していく必要があるといえる。

次に OTFS の変復調手順について説明する。OTFS の変復調の手順を図 2.11 に示す[43]。OTFS ではまずドップラー-遅延領域において送信信号 $x[k, l]$ を生成する。次に ISFFT

(Inverse Finite Fourier Transform) によってドップラー-遅延領域の信号である $x[k, l]$ を時間-周波数領域の信号 $X[n, m]$ に変換する。理論式については後述する。次にハイゼンベルグ変換を行うことで時間領域の信号 $s(t)$ に変換し、チャンネルを介して信号を送信する。受信側では時間領域の信号 $r(t)$ を取得し、離散ウィグナー変換により時間-周波数領域の信号 $Y[n, m]$ に変換する。最後に SFFT (Simplistic Finite Fourier Transform) により遅延-ドップラー領域の信号 $y[k, l]$ に変換する。以上述べたように、OTFS では送受信信号の表現はドップラー-遅延領域で行いつつ、実信号の送受信自体は従来と同じ時間-周波数領域で行う。

最後に OTFS の理論式について述べる。まず遅延-ドップラー領域から時間-周波数領域への変換式である ISFFT、時間-周波数領域から遅延-ドップラー領域への変換である SFFT の式を以下に示す[45]。2次元フーリエ変換の変形であり、OFDM の変調器に機能を追加することで実現することができる。

$$X[n, m] = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} x[k, l] e^{j2\pi(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M})} \quad (2.6)$$

$$x[k, l] = \sum_{n=0}^{M-1} \sum_{m=0}^{N-1} X[n, m] e^{-j2\pi(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M})} \quad (2.7)$$

M はタイムスロットの数、 N は周波数スロットの数、 n は時間、 m は周波数、 k は遅延、 l はドップラーをそれぞれ示す。

次に時間-周波数領域の信号を時間領域の信号に変換するハイゼンベルグ変換、時間領域の信号を時間-周波数領域の信号に変換する離散ウィグナー変換の理論式を以下に示す[43]。

$$s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} X[n, m] e^{j2\pi m \Delta f (t-nT)} g_{tx}(t-nT) \quad (2.8)$$

$$A_{g_{tx,r}}(k, l) = \int e^{-j2\pi l(t-k)} g_{tx}(t-k) r(t) dt \quad (2.9)$$

$$Y[n, m] = A_{g_{tx,r}}(k, l)|_{k=nT, l=m\Delta f} \quad (2.10)$$

g_{tx} は送信側のパルス信号, $A_{g_{tx,r}}$ は cross-ambiguity 関数を示す. 離散ウィグナー変換ではまず式(2.9)の cross-ambiguity 関数により, 受信信号とパルス波を同期させる. 次に式(2.10)により時間, 周波数毎にサンプリングをすることで, スロット毎の値を算出している.

OTFS について本論文ではシミュレーションを行う部分までは至らなかったが, ドップラーシフトやマルチパスが課題となる非地上系ネットワークにおいて有効性の高い通信方式であると考え. 今後も具体的なユースケースや実現可能性も含めて検討を続けていきたい.

3. 地上-HAPS 間アップリンク通信における PDMA の適用に関する研究

3.1 概要・研究背景

本章では地上-HAPS 間のアップリンク通信に着目し、PDMA や NOMA の適用により通信性能を向上させるシステムについて提案する。2.1.4 において先述したように、HAPS は災害時における通信の提供、地理的制約・政治的制約等により地上ネットワークが利用できない地域に向けた通信の提供、地上ネットワークとの相互運用による負荷軽減等の様々な役割が期待されている。また HAPS Mobile のようにユーザ端末が直接通信を行うことのできる基地局も開発されており、今後ユーザ数が増大していくことが予想される。そのため HAPS-地上間通信における通信性能を向上させる多重アクセス方式が必要である。HAPS-地上間通信においてスループットを増大させる通信方式として、NOMA を適用したシステムが複数の研究者により研究されている[46][47]。2.2.2 において述べたように、NOMA では同一の時間・周波数上で複数の信号を送信し、電力領域において信号の多重化・分離を実装することで周波数利用効率を大幅に改善することができる。一方で信号の復号を成功させるためには、ユーザの受信電力に一定以上の差をつける必要があるため、各ユーザの通信レートにも差ができてしまい、公平性の観点から問題がある。図 1.1 において示した非地上系ネットワークにおいて、HAPS はユーザと直接通信を行うエンド部分を担っているため、HAPS-地上間の通信はユーザの QoS に直結する。またモバイル通信にも用いられることを考慮すると、ユーザ間の通信レートの差が大きい点は好ましくないといえる。そのため本論文では HAPS-地上間通信に PDMA を適用する手法について探求する。2.2.3 において述べた通り、PDMA では各ユーザの電力レベルを周期的に切り替えるため、平均通信レートが近い値になり、ユーザ間の公平性が確保される。一方でチャネル状態の悪いユーザが良いユーザよりも高い電力レベルに配置されることもあるため、電力効率が悪化し、スループットは NOMA よりも低下することが予想される。そこで本論文では PDMA と NOMA をそれぞれ適用した HAPS-地上間アップリンク通信システムを提案し、シミュレーションによって BER, スループット, ユーザ間の公平性等を比較する。なお 2.2.3 に記載した通り、PDMA の非地上系ネットワークへの適用については、地上-静止軌道衛星間の通信では検討されているが[42]、地上-HAPS 間及び地上-低軌道衛星間では検討されていない。そのため本研究では地上-HAPS 間アップリンク通信に着目する。

本論文で提案するシステムは 3 つの特徴を有する。具体的なシステムの通信手順及びそれぞれの特徴の詳細については 3.3 において述べるため、本節では概略のみ記す。第 1 に、光とミリ波のハイブリッドな運用を実装する。2.1.5 において述べたように、光通信は電波よりも高速な通信を実現することができる。一方で大気減衰や雲による減衰の影響を強く受けるため、地上-HAPS 間の伝播路の状態に応じては光通信を利用することができない。そのため伝播路の状態に応じて光とミリ波を切り替える仕組みを実装する。第 2 に、PDMA を適用する。光とミリ波の両方の領域において PDMA を実装し、スループットを高

めつつユーザ間の公平性を確保するシステムの実現を目指す。第3に、各ユーザの伝搬路の状態に応じて送信電力を制御する手法を導入する。

3.2 地上間-HAPS間のチャネルモデル

本節では題材として取り扱う地上-HAPS間アップリンク通信のチャネルモデルについて記載する。3.1において述べたように、本論文で提案するシステムでは光とミリ波のハイブリッドな運用を実装する。そのため光、ミリ波それぞれのチャネルモデルについて理論計算の結果も交えて述べる。

3.2.1 光

地上-HAPS間アップリンク光通信におけるHAPSの受信電力は次式より表される[48]

$$P_r = P_t \left(\frac{D_2}{D_1 + \theta L} \right)^2 r_t r_r h_W h_t \quad (3.1)$$

P_t は送信電力、 P_r は受信電力、 D_1 、 D_2 は送信機・受信機の口径、 r_t 、 r_r は送信機・受信機の光効率、 θ は送信機の発散角、 L は伝搬距離を指す。また h_W は気象状態に基づくチャネル係数、 h_t は大気乱流によるチャネル状態を指し、これらの値が気象及び大気の状態に応じて変動する。

気象状態に基づくチャネル係数 h_W は次式より求められる[49]。

$$h_W = 10^{(-\gamma L/10)} \quad (3.2)$$

γ は減衰定数を示し、次式より求められる[49]。

$$\gamma = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-\delta} \quad (3.3)$$

V は視程、 λ は波長、 δ は粒子関連係数を指す。視程とは大気の混濁の度合いを指す指標であり、肉眼で目標物を見分けることのできる最大距離を示す。そのため雲や霧により視界が悪い場合、視程は小さい値になる。粒子関連係数は視程の実測値に基づいて算定されたKimモデルにより、次式から算出される[49]。

$$\delta = \begin{cases} 1.6 & (V \geq 50) \\ 1.3 & (6 \leq V < 50) \\ 0.16V + 0.34 & (1 \leq V < 6) \\ V - 0.5 & (0.5 \leq V < 1) \\ 0 & (V < 0.5) \end{cases} \quad (3.4)$$

次に式(3.1)の大気乱流に基づくチャネル係数の計算方法について述べる。大気乱流に基づくチャネル係数は、確率密度関数(pdf)によって推定する。大気乱流の大きさに応じて様々な確率分布のモデルが存在する[49]。具体的には弱領域に対応した対数正規分布モデル、弱～強領域に対応したガンマ・ガンマモデル、飽和領域に対応した負指数モデル等である。本論文では広い領域に対応したガンマ・ガンマモデルを採用する。ガンマモデルにおける大気乱流のチャネル係数のpdfを次式に示す[50]。

$$p(h_t) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h_t^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_t}) \quad (3.5)$$

α は屈折に関するパラメタ, β は散乱に関するパラメタ, Γ はガンマ関数, K は第2種ベッセル関数を示す. α, β は次式より求められる[50].

$$\alpha = \left[\exp\left(\frac{0.49\sigma_I^2}{(1 + 1.11\sigma_I^{12/5})^{7/6}}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (3.6)$$

$$\beta = \left[\exp\left(\frac{0.51\sigma_I^2}{(1 + 0.69\sigma_I^{12/5})^{5/6}}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (3.7)$$

σ_I はリトフ分散という大気乱流の強さを示す指標を指す. リトフ分散は次式より算出される[50].

$$\sigma_I^2 = 2.25k^{7/6} \sec^{11/6}(\zeta) \int_{h_0}^H C_n^2(h)(h-h_0)^{5/6} dh \quad (3.8)$$

k は波数 ($2\pi/\lambda$), ζ は仰角, h は HAPS の高度, h_0 は地上局の高度, C_n^2 は屈折率構造パラメタを示す. 屈折率構造パラメタは次式より求められる.

$$C_n^2(h) = 0.00594 \left(\frac{v_w}{27}\right)^2 (10^{-5}h)^{10} \exp\left(\frac{-h}{1000}\right) (2.7 \times 10^{-16}) \exp\left(\frac{-h}{1500}\right) + C_n^2(0) \exp\left(\frac{-h}{100}\right) \quad (3.9)$$

v_w は風速を示す.

また降雨減衰についてはミリ波では考慮するが, 光領域では考慮しない. 降雨減衰は光領域でも発生するが, 後述する理論計算の結果でも示す通り, 光信号は薄い霧や雲によって大きく減衰する. 雨が降っている場合は霧や雲も同時に発生している場合が高く, それらによる減衰が支配的となるため[49], 本論文では光信号の降雨減衰は考慮しないものとする.

次に策定したチャネルモデルを基に理論計算した結果を示す. まず式(3.3), (3.4)を基に 1550, 850, 690 nm の波長における減衰定数を計算した結果を図 3.1 に示す. 視程が大きい, 即ち雲や霧が濃いほど減衰が大きくなることが分かる. また視程が 2 km の薄い霧の場合でも減衰定数が 6 dB/km と比較的大きく, 光通信において霧や雲による減衰が大きいことが分かる.

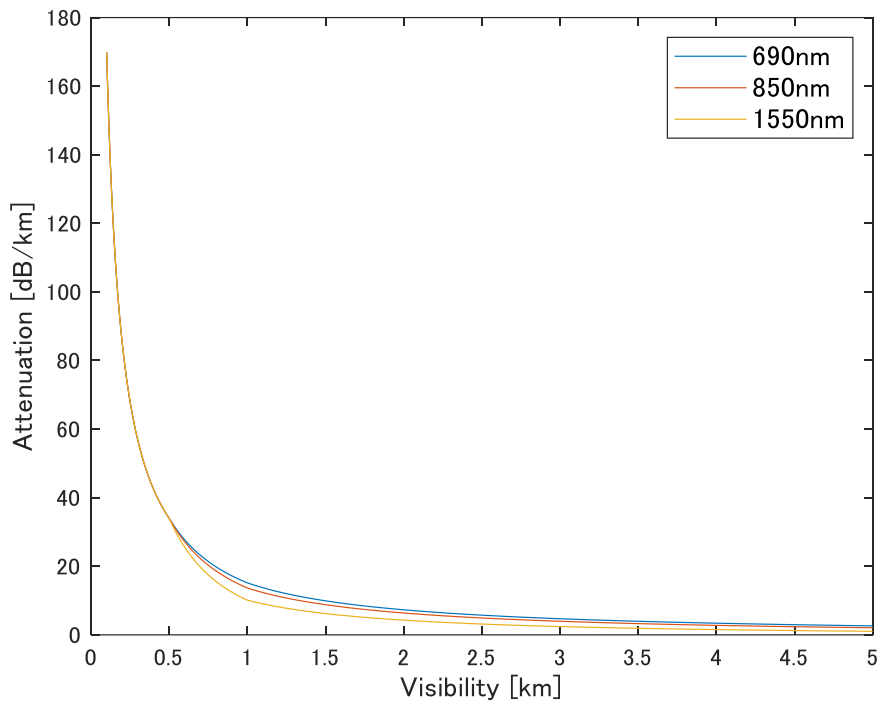


図 3.1 視程による減衰定数の計算結果 (光)

次に式(3.5)~(3.7)を基に大気乱流による減衰の確率密度関数を計算する。リトフ分散と α , β の関係を図 3.2 に、確率密度関数の計算結果を図 3.3 に示す

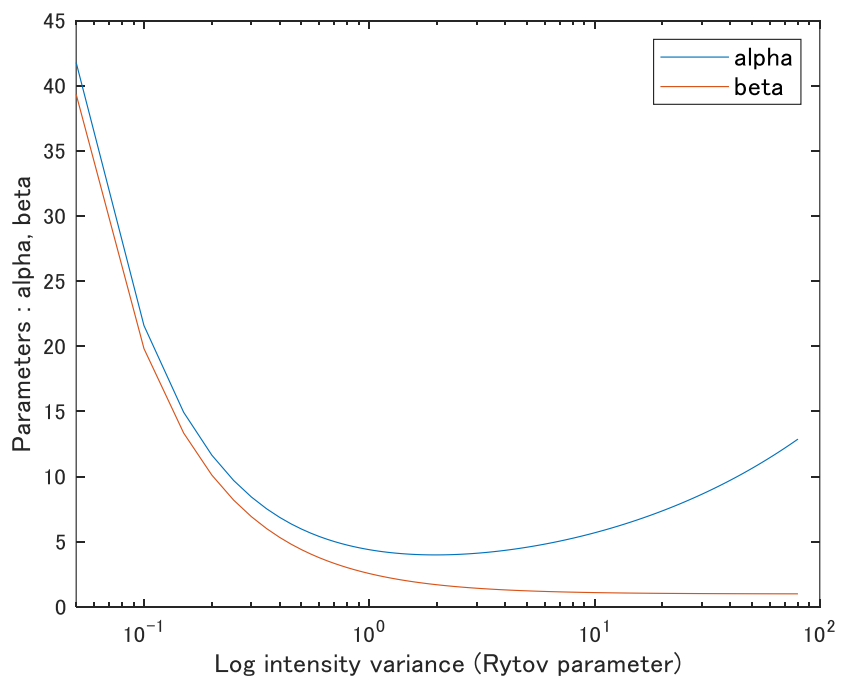


図 3.2 リトフパラメタの計算結果 (光)

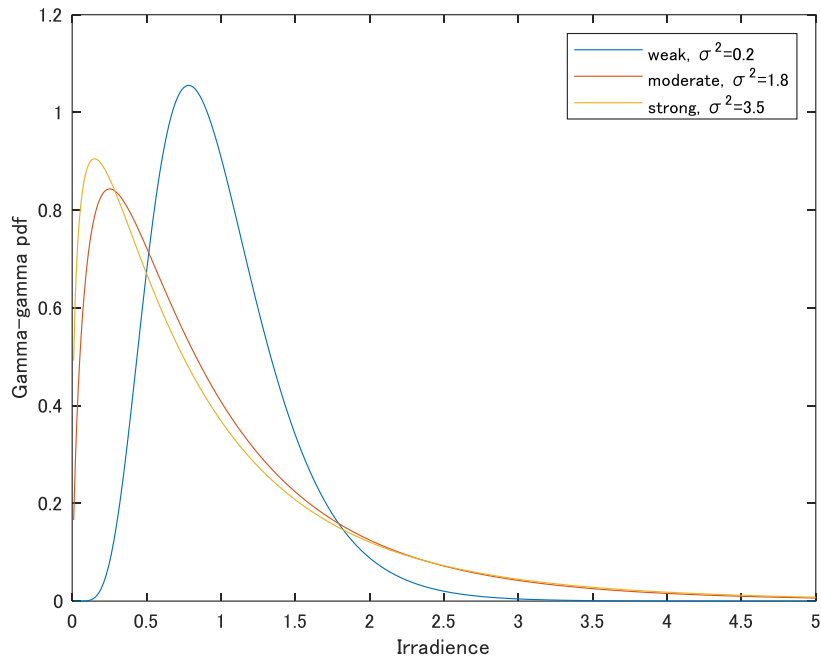


図 3.3 ガンマ・ガンマモデルにおけるチャネル係数の確率密度関数（光）

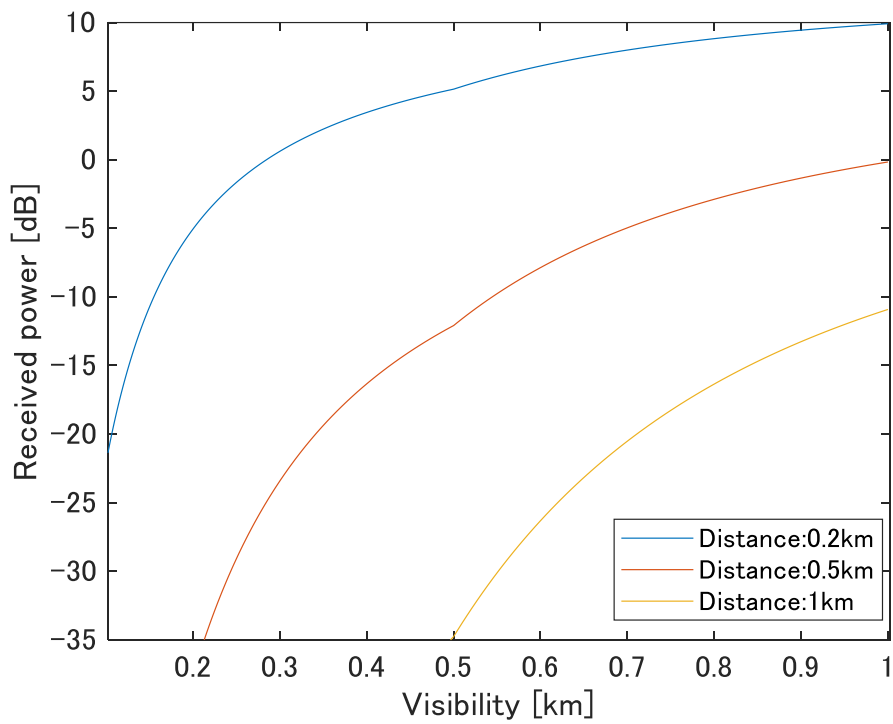


図 3.4 地上-HAPS 間通信の受信電力の理論計算結果（光）

最後に作成したチャネルモデルを基に HAPS-地上間通信の受信電力を計算した結果を図 3.4 に示す。波長を 1550 nm, 送信電力を 20 dBm, 送受信側の口径を 8, 20 cm, 光効率を

0.75 とした。また視程は 0.1~1 km と霧が濃い状態を想定して理論計算を行った。視程の値が大きいほど受信電力の値が大きくなっていることが分かる。

3.2.2 ミリ波

地上-HAPS 間アップリンク通信におけるミリ波のチャンネルモデルについて述べる。パスロスの合計値は次式より求められる [51]。

$$PL = PL_e + PL_b + PL_g + PL_s + PL_r \quad (3.10)$$

PL_e は建物の遮蔽によるロス, PL_b は自由空間ロス等の基本的なパスロス, PL_g は大気減衰によるロス, PL_s は電離層や対流圏シンチレーションによるロス, PL_r は降雨減衰によるロスを示す。建物によるロス PL_e は次式より求められる [51]。

$$PL_e = 10 \log_{10}(10^{0.1A} + 10^{0.1B} + 10^{0.1C}) \quad (3.11)$$

A,B,C は周波数及び人口密度によって決まる定数を指す。なお本章では LoS 環境のみを考慮するため, 3.4 におけるシミュレーションでは建物によるロスは考慮しないものとする。次に基本的なパスロスは次式より求められる。

$$PL_b(d, f, \alpha) = FSPL(d, f) + SF + CL(\alpha, f) \quad (3.12)$$

$FSPL$ は自由空間ロス, SF はシャドーイングによるロス, CL はクラッターロスを指す。また d は送受信間の距離, f は周波数, α は仰角を指す。シャドーイングによるロスとクラッターロスは周波数, 仰角より算定される [51]。自由空間ロスは次式より求められる。

$$FSPL(d, f) = 32.45 + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(d) \quad (3.13)$$

次に大気減衰によるロス PL_g は次式より求められる [52]。

$$PL_g = \frac{A_o + A_w}{\sin \alpha} \quad (3.14)$$

A_o は乾燥空気 (酸素) によるロス, A_w は水蒸気によるロスを示す。 A_o , A_w はそれぞれ次式より求められる。

$$A_o = h_o \gamma_o \quad (3.15)$$

$$A_w = h_w \gamma_w \quad (3.16)$$

h_o , h_w は乾燥空気・水蒸気の等高度, γ_o , γ_w は乾燥空気・水蒸気の比減衰を指す。 h_o , h_w 及びそれらの計算に必要なパラメータは以下より求められる [52]。

$$h_o = \frac{6.1}{1 + 0.17r_p^{-1.1}} (1 + t_1 + t_2 + t_3) \quad (3.17)$$

$$t_1 = \frac{4.64}{1 + 0.066r_p^{-2.3}} \exp \left[- \left(\frac{f - 59.7}{2.87 + 12.4 \exp(-7.9r_p)} \right)^2 \right] \quad (3.18)$$

$$t_2 = \frac{0.14 \exp(2.12r_p)}{(f - 118.75)^2 + 0.031 \exp(2.2r_p)} \quad (3.19)$$

$$t_3 = \frac{0.0114}{1 + 0.14r_p^{-2.6}} f \frac{-0.0247 + 0.0001f + 1.61 \times 10^{-5} f^2}{1 - 0.0169f + 4.1 \times 10^{-5} f^2 + 3.2 \times 10^{-7} f^3} \quad (3.20)$$

$$h_w = 1.66 \left(1 + \frac{1.39\sigma_w}{(f - 22.235 + 2.56\sigma_w)} + \frac{3.37\sigma_w}{(f - 183.31 + 4.69\sigma_w)} + \frac{1.58\sigma_w}{(f - 325.1)^2 + 2.89\sigma_w} \right) \quad (3.21)$$

$$\sigma_w = \frac{1.013}{1 + \exp[-8.6(r_p - 0.57)]} \quad (3.22)$$

$$r_p = (p + e)/1013.25) \quad (3.23)$$

$$e = \rho T/216.7 \quad (3.24)$$

t_1, t_2, t_3 は乾燥空気の等高度の計算に必要なパラメタ, r_p は気圧比, p は乾燥空気圧, e は水蒸気分圧, ρ は水蒸気密度, T は気温を表す.

次に γ_o, γ_w は以下より求められる[52].

$$\gamma_o = 0.1820f \left(\sum_{i(\text{oxygen})} S_i F_i + N_D(f) \right) \quad (3.25)$$

$$\gamma_w = 0.1820f \left(\sum_{i(\text{Water vapour})} S_i F_i \right) \quad (3.26)$$

$$S_i = a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp[a_2(1 - \theta)] \quad \text{for oxygen} \quad (3.27)$$

$$S_i = b_1 \times 10^{-1} e \theta^{3.5} \exp[b_2(1 - \theta)] \quad \text{for water vapour} \quad (3.28)$$

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right] \quad (3.29)$$

$$\Delta f = a_3 \times 10^{-4} (p \theta^{0.8 - a_4} + 1.1e\theta) \quad \text{for oxygen} \quad (3.30)$$

$$\Delta f = b_3 \times 10^{-4} (p \theta^{b_4} + b_5 e \theta^{b_6}) \quad \text{for water vapour} \quad (3.31)$$

$a_1 \sim a_5, b_1 \sim b_5$ は乾燥空気, 水蒸気の比減衰を指し, Recommendation ITU-R p.676.11 より値を取得する[52]. θ は $300/T$ の値を表す.

次に式(3.10)における電離層・対流圏シンチレーションによるロス PL_s は, 電流系シンチレーションによるロス PL_{s1} と対流圏シンチレーションによるロス PL_{s2} の合計より求められる. PL_{s1} は次式より求められる[53].

$$PL_{s1}(f) = \frac{27.5 \cdot S_4^{1.26} \cdot (f/4)^{-1.5}}{\sqrt{2}} \quad (3.32)$$

S_4 はシンチレーションインデックスを示す. また対流圏シンチレーション PL_{s2} は表 3.1 より, 仰角から推定した[54].

表 3.1 対流圏シンチレーション

仰角 [deg]	対流圏シンチレーション[dB]
10	1.08
20	0.48
30	0.30
40	0.22
50	0.17
60	0.13
70	0.12
80	0.12
90	0.12

次に式(3.10)における降雨減衰によるロス PL_r は次式より求められる[3-2-2-5].

$$PL_r = kR^\alpha d \quad (3.33)$$

k , α は周波数毎に決定される減衰係数, R は降水量[mm/h], d は送受信間の距離を示す.
 k , α は次式より求められる[55].

$$k = \frac{[k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2\gamma]}{2} \quad (3.34)$$

$$\alpha = \frac{[k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + k_H \alpha_H - k_V \alpha_V] \cos^2 \theta \cos 2\gamma}{2} \quad (3.35)$$

k_H , α_H は水平偏光の減衰係数, k_V , α_V は垂直偏光の減衰係数を示す. k_H , k_V , α_H , α_V は以下より求められる[55].

$$\log_{10} k_{(H \text{ or } V)} = \sum_{j=1}^4 \left(a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] \right) + m_k \log_{10} f + c_k \quad (3.36)$$

$$\alpha_{(H \text{ or } V)} = \sum_{j=1}^5 \left(a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] \right) + m_k \log_{10} f + c_k \quad (3.37)$$

a_j , b_j , c_j , m_k は大気中の各種成分のパラメタを表しており, Recommendation ITU-R P.838-3 から引用している[56].

次にミリ波のチャンネルモデルに関する理論計算の結果を示す. 第1に, 式(3.10)を基に周波数毎の大気減衰の値を計算した結果を図 3.5 に示す. この結果は[52]の結果と一致する. 第2に, 式(3.14)~(3.31)に基づき, 大気減衰によるロス PL_g を計算した結果を図 3.6 に示す. 周波数を 30 GHz, 気温を 15 度, 気圧を 1013 Pha, 高度を 20 km として計算を行った.

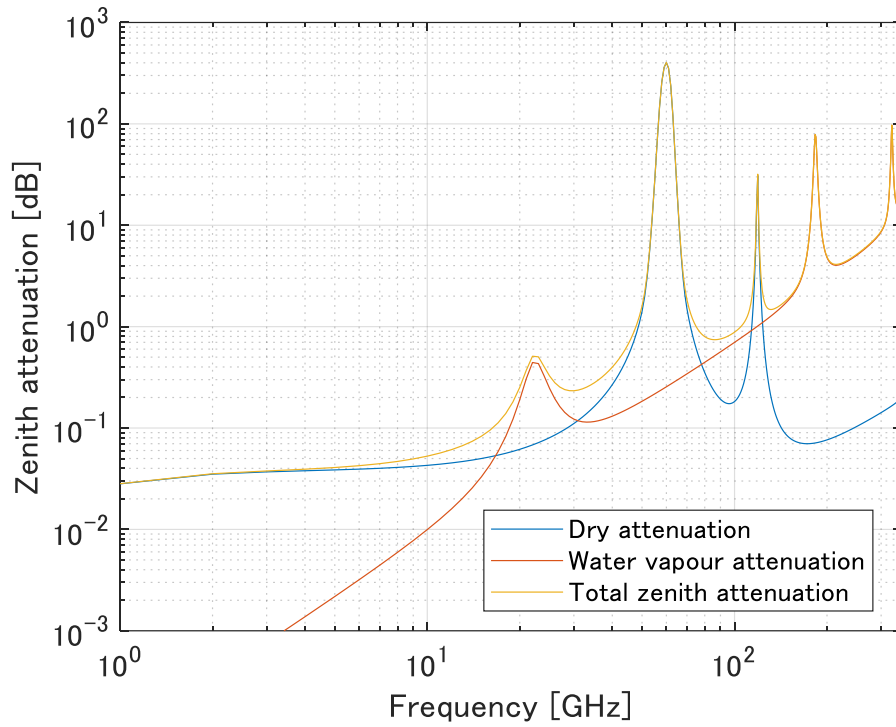


図 3.5 周波数-減衰の関係 (ミリ波)

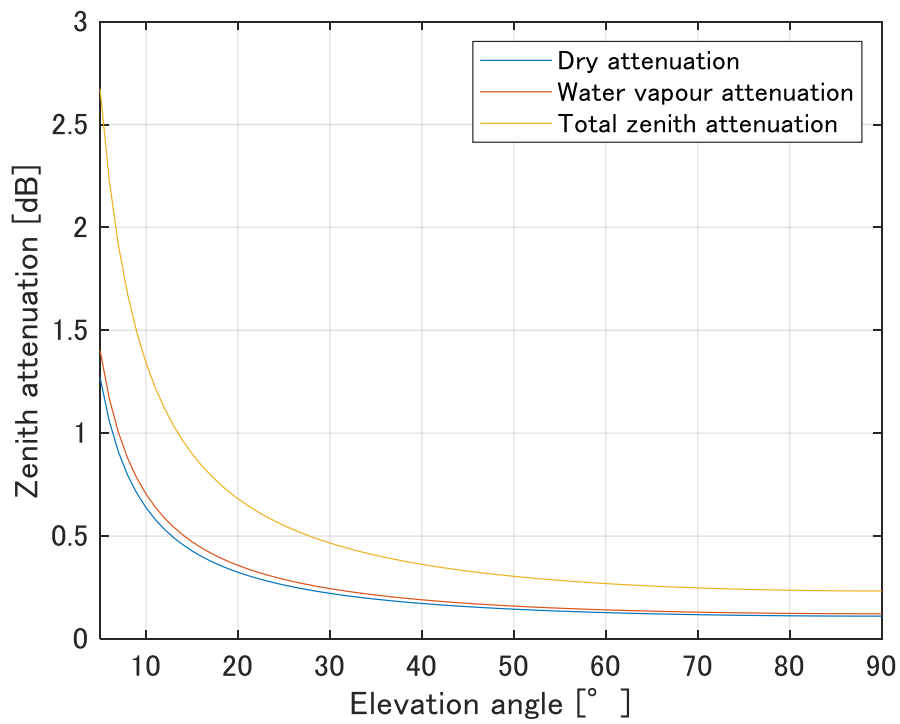


図 3.6 大気減衰の計算結果 (ミリ波)

第3に、3種類の降水量を定義し、式(3.33)~(3.37)に基づき伝搬距離に応じた降雨減衰の大きさを計算した結果を図3.7に示す。周波数は20,30,40 GHzとした。降水量が多いほど減衰量も大きくなっていることが分かる。

第4に、式(3.10)~(3.37)に基づき、地上-HAPSチャンネルにおけるパスロスの合計値を計算した結果を図3.8に示す。周波数を30 GHz、気温を15度、気圧を1013 Pha、高度を20 kmとし、4段階の降水量を想定して計算を行った。降水量53.6 mm/hのStorm rainの時は減衰の値が非常に大きく、ミリ波帯は降雨減衰の影響を強く受けることが分かる。

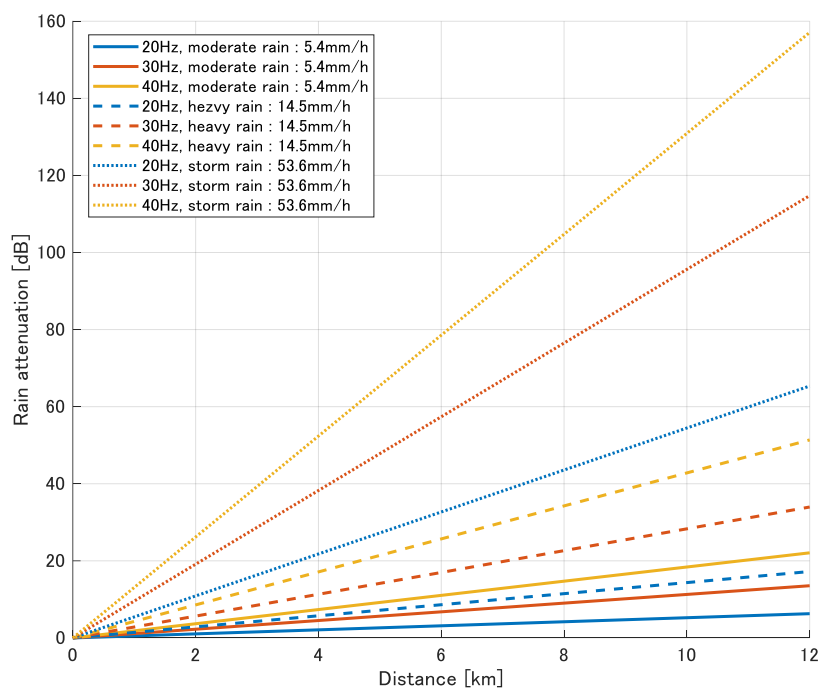


図 3.7 降雨減衰の計算結果（ミリ波）

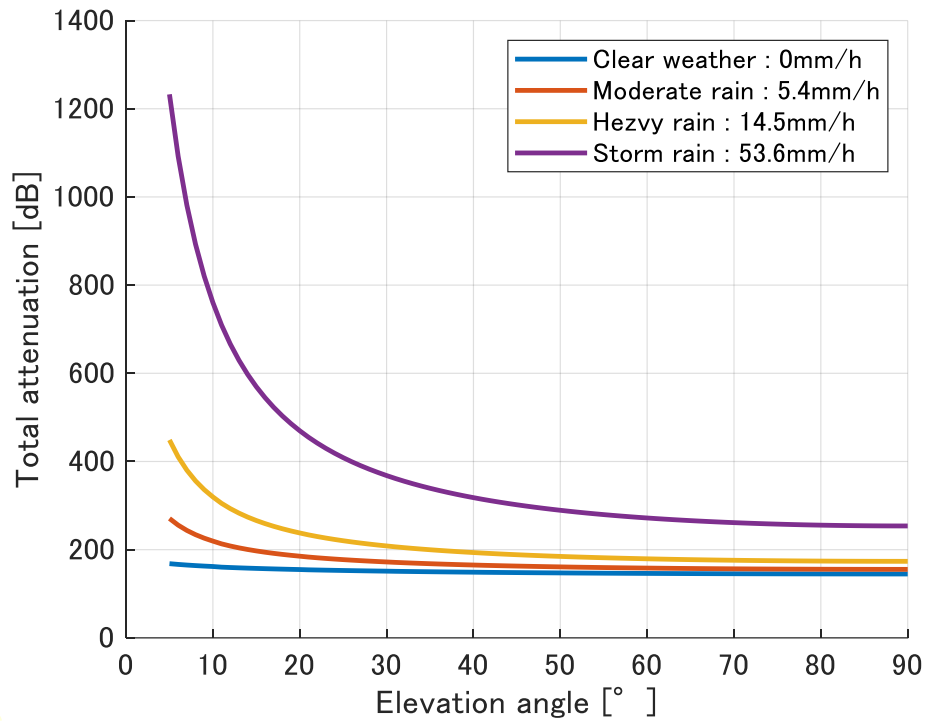


図 3.8 地上-HAPS 間チャンネルにおけるパスロスの合計値 (ミリ波)

3.3 システムモデル

本節では提案する PDMA を適用した地上-HAPS 間アップリンク通信システムに関する詳細を記述する。初めに提案システムの通信手順について説明し、次に提案システムの特徴である光/ミリ波切り替えの実装、PDMA/NOMA の適用、独自の電力制御アルゴリズムの実装の3点について詳細を記述する。

3.3.1 通信手順

提案する地上-HAPS 間アップリンク通信システムのモデルを図 3.9 に示す。提案システムでは複数の地上局から HAPS へ向けて送信を行うアップリンクの環境を想定する。各ユーザの配置はランダムであり、雲や大気減衰等のチャンネルの状態もそれぞれ異なる状態であると仮定する。提案システムにおける具体的な通信手順を以下に記載する。

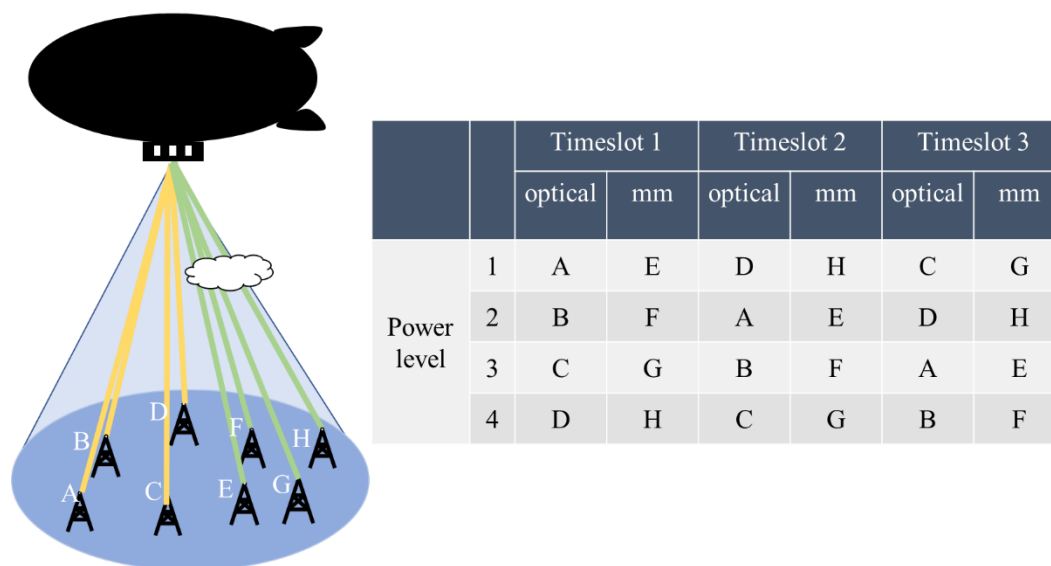


図 3.9 PDMA を適用した地上-HAPS 間アップリンク通信システムのモデル

1. 各地上局はチャンネル状態測定用の光参照信号を HAPS へ送信する。チャンネル状態の測定はユーザの状態に関わらず一定間隔置きに行う。
2. HAPS 側で各地上局の参照信号を受信し、その受信電力から各ユーザのチャンネル状態及びチャンネル係数を見積もる。
3. 手順 2 の結果に基づき、各ユーザを光またはミリ波に割り当てる。具体的には、受信電力が閾値を超えるユーザ、即ちチャンネル状態の良いユーザを光、残りの受信電力が閾値を下回るユーザをミリ波に割り当てる。

4. 光，ミリ波それぞれの領域において PDMA を適用し，各タイムスロットにおける電力レベルの割当を決定する．複数のユーザが同一のサブバンドに割り当てられる．また各ユーザの電力レベルは周期的に切り替えられる．詳細は 3.3.3 において述べる．
5. 手順 2 のチャンネル係数の見積もり結果に基づき，各ユーザの各タイムスロットにおける送信電力を決定する．電力制御アルゴリズムの詳細は 3.3.4 において述べる．
6. HAPS から地上局に各タイムスロットにおける電力レベルの割当と送信電力を通知する．
7. 地上局は HAPS から通知された電力レベルと送信電力に従い，信号を送信する．
8. HAPS は信号を受信し，SIC により信号を分離，復号する．

以上述べたように，本システムでは各ユーザをチャンネルの状態に応じて光とミリ波に振り分け，各領域において PDMA を実装し，電力レベルを周期的に切り替える．最終的には図 3.9 中の表のような割当表を作成し，ユーザに通知する．また各サブバンド及びタイムスロットにおいて独自の電力制御アルゴリズムに基づき，各ユーザの送信電力を決定する．

本システムの利点としては，PDMA の適用によりユーザ間の公平性を確保しつつ，電力領域における多重化により OMA よりも高いスループットを実現することができる点が挙げられる．一方で欠点としては，手順 1~6 において一定の時間ロスが発生してしまう点が挙げられる．手順 1, 2 は地上局の通信状態に関わらず定期的に行う方式を想定しており，手順 3~6 はユーザからの通信要求を受けた時点で行う形を想定している．そのため通信要求を受けてから電力レベルの割当，送信電力の決定を行いユーザに通知する部分で時間ロスが生じてしまう．これらは 3way ハンドシェイク等，通信リンクを確立する時に行う形を想定しているが，電力制御のアルゴリズム等，計算時間のかからない手法を検討する必要があるといえる．

3.3.2 光/ミリ波切り替え

3.3.1 において述べた通り，本システムでは各ユーザのチャンネル状態に応じて光とミリ波を切り替える方式を実装する．光リンクは雲や大気減衰による減衰の影響を強く受けるため，チャンネルの状態によっては利用することはできない．そのためチャンネルの状態に応じて光とミリ波を使い分ける方式を採用する．ミリ波は光に比べると伝送速度が低下するが，雲による減衰や大気減衰に強い波長である．光/ミリ波切り替えの実装例を図 3.10 に示す．3.3.1 において論じた通り，各ユーザから HAPS に向けて光参照信号を送信し，その受信電力に応じて光とミリ波に割り当てる．各ユーザの受信電力が閾値を上回る，即ちチャンネル状態が良い場合は光に割り当てる．一方受信電力が閾値を下回る，即ちチャンネル状態が悪い場合はミリ波に割り当てる．例えば図 3.10(A)のように全ユーザのチャンネル状態が良い場合は全ユーザが光に割り当てられる．(B)のように一部のユーザのみチャンネル状態が良い場合，チャンネル状態が良いユーザのみが光に割り当てられ，残りのチャンネル状態が悪いユ

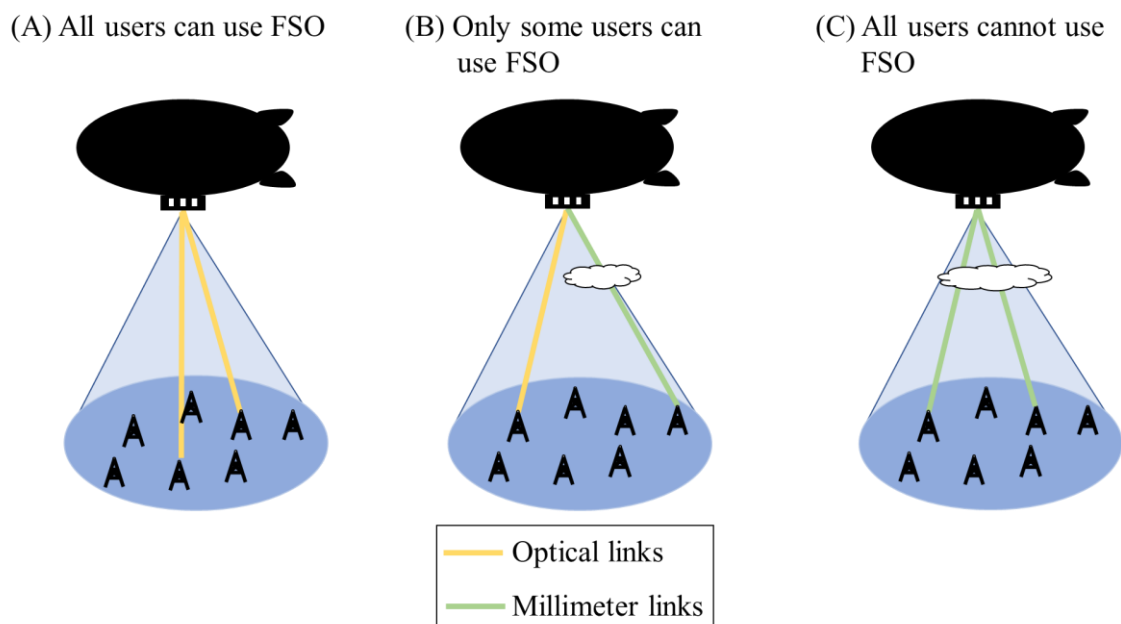


図 3.10 光/ミリ波切り替えの実装

ユーザはミリ波に割り当てられる。(C)のように雲等の影響により全ユーザのチャンネル状態が悪い場合、全ユーザがミリ波に割り当てられる。本研究では高度 20 km の HAPS に対して仰角が 10~90 度となる範囲をセルと置く。また詳細は 3.4.1 において後述するが、各ユーザの視程は統計データに基づき算出する。しかしセルの中で各ユーザの視程がどの程度変動するか、という点については別途検討が必要である。

3.3.3 PDMA と NOMA の適用

3.1 において述べた通り、本研究では PDMA と NOMA をそれぞれ実装し、性能を比較する。まず NOMA の適用について説明する。電力レベルを 4 段階にした場合の NOMA の適用例を図 3.11 に示す。2.2.2 において述べた通り、NOMA では電力領域における多重化を実装することで、同一時間、周波数上で複数の信号を送信する。受信側では SIC により多重化された信号を分離し、各信号を復号する。周波数利用効率が高くなるため、スループットや遅延時間といった通信性能が向上する。一方 NOMA の弱点として、ユーザ間の通信レートに差が出てしまう点が挙げられる。NOMA では図 3.11 に示した通り、各ユーザは常に固定のチャンネルを使用する。一般的には電力効率性の観点から、チャンネル状態が良い（伝播距離が短い）ユーザが高い電力レベルに、チャンネル状態が悪い（伝播距離が長い）ユーザが低い電力レベルになるように制御される。逆にチャンネル状態が悪いユーザが高い電力レベルになるように制御した場合、最大送信電力の制約を考慮すると高い電力レベルのユーザの受信電力が小さくなるため、スループットが低下する。そのためチャンネル状態

が良いユーザが高い電力レベルになるように設定する。NOMA では受信側で信号を分離するために、各電力レベルのユーザの信号の受信電力に一定の差をつける必要がある。そのため結果として図 2.9 に示した通り、ユーザ間のデータレートにも差が生じてしまい、ユーザ公平性の観点から問題がある。

一方 PDMA は NOMA と同様に電力領域における多重化を実装しつつ、各ユーザの電力レベルを周期的に切り替える方式である。電力レベルを 4 段階にしたときの PDMA の割り当て例を図 3.12 に示す。2.2.3 で述べた通り、PDMA では各ユーザが均等に全電力レベルに割り当てられるため、各ユーザの平均ユーザレートが近い値となる。そのためユーザ間の公平性が確保された方式であるといえる。一方 PDMA ではチャネル状態が悪いユーザが良いユーザよりも高い電力レベルに割り当てられることも多くなる。したがって電力効率性の観点においては NOMA よりも劣っており、スループットは低下することが予測される。

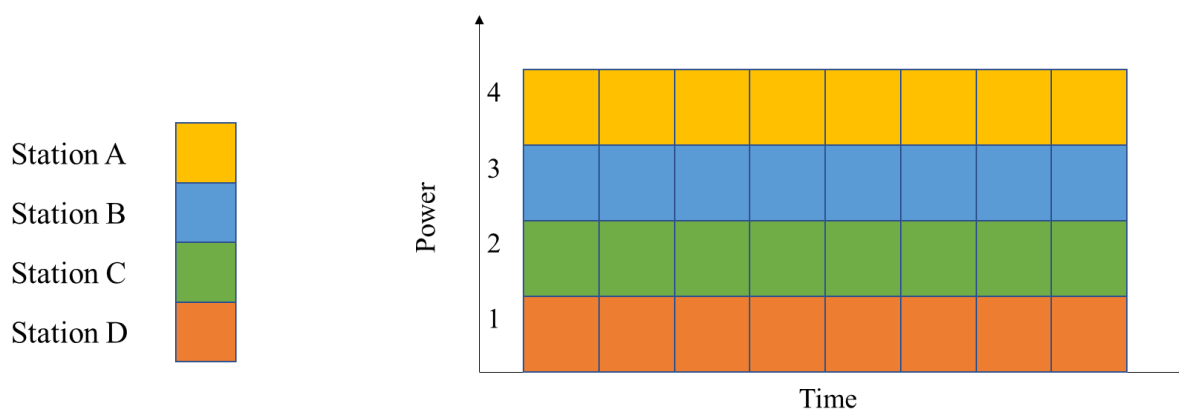


図 3.11 NOMA の割り当て例

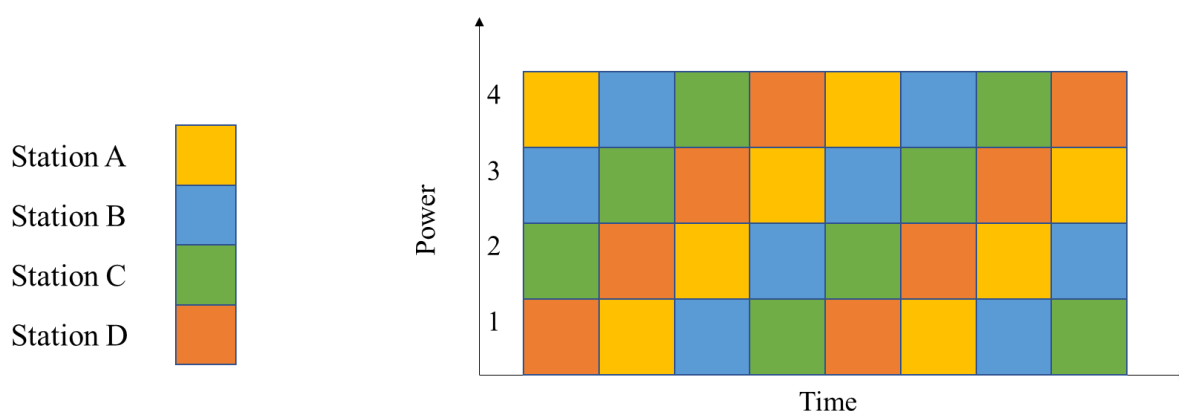


図 3.12 PDMA の割り当て例

本研究では 3.3.1 において述べた通り、各ユーザを参照信号の受信電力に応じて光とミリ波に振り分け、各領域において NOMA または PDMA を適用する。光、ミリ波それぞれの領域において NOMA, PDMA をそれぞれ適用した例を図 3.13, 図 3.14 に示す。NOMA では光、ミリ波各領域にユーザを振り分けた後、光、ミリ波各領域において各ユーザをチャネル状態が良いユーザがより高い電力レベルに割り当てられるように順番に割り当てていく。一方 PDMA の場合は光、ミリ波各領域にユーザを振り分けた後、各領域において PDMA を適用し、各ユーザの電力レベルを周期的に切り替える。光に割り当てられたユーザとミリ波に割り当てられたユーザで通信レートに差がつくことが予想されるが、それぞれの領域内においてはユーザ間の公平性が確保される。

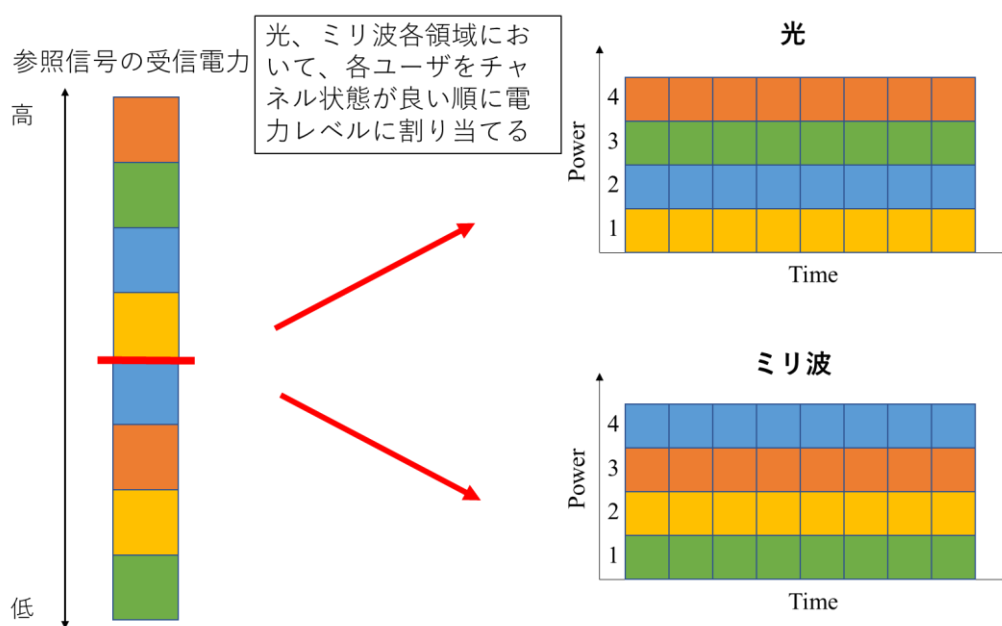


図 3.13 提案システムへの NOMA の適用例

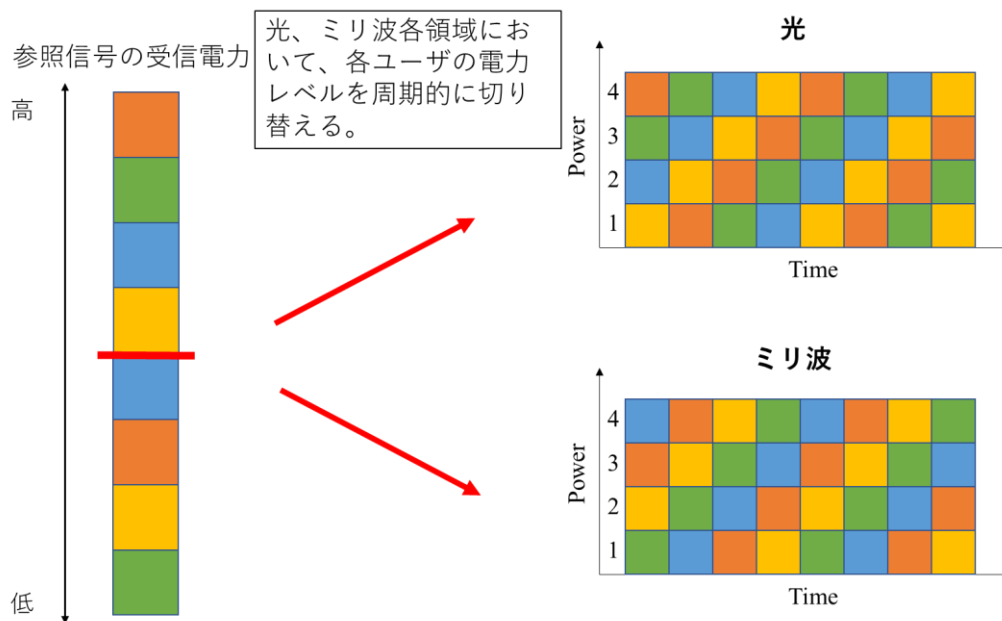


図 3.14 提案システムへの PDMA の適用例

3.3.4 電力制御方式

3.3.1 において述べた通り，本システムでは PDMA 及び NOMA の各サブバンドにおいて独自の電力制御方式を適用する．PDMA 及び NOMA ではユーザ間の受信電力の差に基づき信号を分離するため，電力制御方式が非常に重要である．同一チャネル上の信号間の電力差が小さい場合，受信電力が大きいユーザの信号を復号する際の干渉電力が相対的に大きくなるため，受信電力が大きいユーザの信号の復号に失敗する確率が高くなる．また受信電力が大きい信号の復号に失敗した場合，その復号結果が受信電力の小さい信号の復号にも影響を与えるため，誤差伝搬が起きる．一方受信電力が小さいユーザの信号の受信電力が極端に小さい場合，信号を検出できず復号に失敗する確率が高くなる．そのため信号間に適切な電力差をつけつつ，同一チャネル上の全ての信号の復号に成功する確率を高くする電力制御アルゴリズムが必要である．また 3.3.2 において先述したように，地上-HAPS 間のリンクは大気減衰及び霧や雲といった些細な天候の変化の影響を強く受けるため，各ユーザのチャネル状態が頻繁に変化する．そのためユーザ間のチャネル状態の違いや時間に応じて変化するチャネル状態にリアルタイムで対応する電力制御アルゴリズムが必要であるといえる．

NOMA におけるもっとも一般的な電力制御方式として固定電力割当方式がある[41]．固定電力割当方式とは，各ユーザに割り当てる電力の割合を予め固定値に設定する方式である．例えばユーザ数 2 人のダウンリンク NOMA において，電力割り当て率をそれぞれ 0.7, 0.3 に設定した場合，各ユーザの送信電力は最大送信電力の 0.7 倍，0.3 倍となる．固定電

力割当方式は送受信間の伝搬距離が一定あるいは予測可能である場合、またチャネルの状態が一定である場合に優位性を発揮する方式である。チャネル状態の推定結果を基に適切な割り当て率を設定することで信号の分離に成功する確率を高めることができる。また計算時間にかかるオーバーヘッドが存在しないため、データを即時送信することができる。

次に最適化計算により各ユーザの QoS を保証しつつスループットを最大化する電力制御方式や合計送信電力を最適化する電力制御方式等が様々な研究者により提案されている [41][57]。しかし最適化方式は計算にかかるオーバーヘッドが大きいため、3.3.1 において述べたような、チャネル状態に応じてリアルタイムに送信電力を制御する必要のある本システムには適さない。そのため本論文では各ユーザのチャネル状態に応じた送信電力の制御を実現しつつ、オーバーヘッドの小さい方式を提案する。

提案する電力制御方式について述べる。簡単化のために 2 ユーザの NOMA を想定する。まず受信電力の大きいユーザ及び小さいユーザの SINR はそれぞれ次のように表される。

$$\text{SINR}_{\text{strong}}(t) = \frac{|H_1(t)|^2 P_1}{|H_2(t)|^2 P_2 + \sigma_n^2} \quad (3.38)$$

$$\text{SINR}_{\text{weak}}(t) = \frac{|H_2(t)|^2 P_2}{\sigma_n^2} \quad (3.39)$$

$H_1(t)$ は受信電力が大きいユーザ-HAPS 間のチャネル係数、 $H_2(t)$ は受信電力が小さいユーザ-HAPS 間のチャネル係数を指す。 P_1 、 P_2 は受信電力が大きいユーザ及び小さいユーザの送信電力を指す。 σ_n は白色ガウス雑音 (AWGN) の電力を指す。チャネル状態が悪い場合、チャネル係数は小さくなる。一方チャネル状態が良い場合、チャネル係数は大きくなる。本論文で提案する電力制御方式ではこのチャネル係数を基に送信電力を決定する。

具体的には、まず各ユーザのチャネル係数を基に各ユーザの仮の送信電力を次式に基づき計算する。

$$P'_1 = \frac{|H_2(t)|^2}{|H_1(t)|^2 + |H_2(t)|^2} \quad (3.40)$$

$$P'_2 = \frac{|H_1(t)|^2}{|H_1(t)|^2 + |H_2(t)|^2} \times \text{bias} \quad (3.41)$$

P'_1 、 P'_2 は受信電力が大きいユーザ、小さいユーザの仮の送信電力を指す。式(3.40)、(3.41)より、各ユーザの送信電力はチャネル係数に基づき変動する。例えば受信電力が小さいユーザのチャネル係数が、受信電力が大きいユーザのチャネル係数よりも相対的に小さい場合、受信電力が小さいユーザの仮の送信電力 P'_2 が大きくなる。また bias は 2 ユーザの受信電力に差を着けるための係数、バイアス値を指す。1 以下の値に設定し、値を小さくするほど 2 ユーザの受信電力に差がつく。バイアス値の増減と通信性能の関係については 3.4.5 に述べる。

次に P'_1 、 P'_2 の値を基に、送信電力が大きいユーザの送信電力が最大送信電力の値と一致するようにそれぞれの送信電力を最適化する。 $P'_1 \geq P'_2$ の場合は次の式に基づき制御を行う。

$$P_1 = P_{max} \quad (3.42)$$

$$P_2 = P_{max} \times \frac{P'_2}{P'_1} \quad (3.43)$$

P_{max} は地上局の最大送信電力を指す。反対に $P'_1 < P'_2$ の場合は次の式に基づき、各ユーザの送信電力を決定する。

$$P_2 = P_{max} \quad (3.44)$$

$$P_1 = P_{max} \times \frac{P'_1}{P'_2} \quad (3.45)$$

本方式は時間変化する各ユーザのチャネル状態に基づいた制御を行いつつ、オーバーヘッドの少ない方式である。固定電力割当方式と比較すると、本方式はチャネル状態を考慮した制御を行うため、バイアス値を適切な値に制御することでより高いスループットや通信精度を実現できると考える。また先述した最適化方式と比べると簡易であるため、オーバーヘッドは減るが通信性能は劣化すると考えられる。しかし本論文で提案するシステムはチャネル状態が刻一刻と変化する環境を前提としたシステムであり、PDMAでは電力レベルを周期的に切り替えるため、その都度送信電力の再計算が必要である。そのためオーバーヘッドの少ない本方式を採用するものとする。

3.4 結果・考察

本章では 3.3 において提案した地上-HAPS 間アップリンク通信システムに関するシミュレーションを行い、BER、スループット、フェアネスインデックスといった指標を測定し、NOMA と PDMA を比較する。

3.4.1 シミュレーション手法・条件

シミュレーションでは 3.3.1 で述べた通信手法で通信を行う。また 3.3.2 で述べた光/ミリ波切り替え、3.3.3 で述べた PDMA 及び NOMA、3.3.4 で述べた電力制御方式をそれぞれ実装する。シミュレーション条件を表 3.2 に示す。地上局は HAPS との仰角が $10\sim 90^\circ$ になる範囲（HAPS の高度が 20 km であるため半径 110 km の円の範囲）でランダムに生成する。HAPS の位置を座標(0,0,0)とし、地上局の位置をランダムに決定した結果を図 3.15 に示す。また各ユーザの視程は気象庁が公開している東京都の観測所における視程の実測値の統計を基にランダムに生成する [58]。気象庁の統計を基に算出した確率密度関数を図 3.16 に示す。降水量については統計を基に算出するとほとんど差がつかないため、 $0\sim 10$ mm/h の一様乱数とした。視程について今回は東京都のある 1 つの観測所の統計を基に算出したが、地上局の位置に基づく相関は反映できていない。例えばある 1 つの地上局の視程が小さければ近くに位置する他の地上局の視程が低い確率も高くなる。そのため今後は衛星写真等に基づくより実証的なシミュレーションを進めていきたい。

シミュレーションにおける具体的な通信方式としては、まず地上局から HAPS に向けて参照信号を送信する。参照信号の受信信号を基に各ユーザを光、ミリ波に振り分け、各領域において NOMA 及び PDMA のチャンネルや電力レベルの割り当てを決定する。その割当を基に地上局から HAPS へ向けて BPSK 信号を送信する。受信側では多重化された信号を受信し、SIC により信号を分離、復号する。復号した信号と元信号を比較することで BER を算出する。また受信電力を基に通信レート、フェアネスインデックスを算出する。

表 3.2 シミュレーションパラメタ (地上-HAPS 間アップリンク通信)

項目	値
波長 (光)	1,550 nm
周波数 (ミリ波)	20 GHz
送受信機の口径	8, 20 cm
ユーザ数	20
HAPS の高度	20 km
地上局の仰角	10~90 度の範囲でランダムに生成
視程	東京都の統計データを基にランダムに決定
降水量	0~10 mm/h の範囲でランダムに決定
変調方式	BPSK+PDMA/NOMA/OMA
PDMA における タイムスロット長	1 ms
PDMA,NOMA における 電力レベル数	2

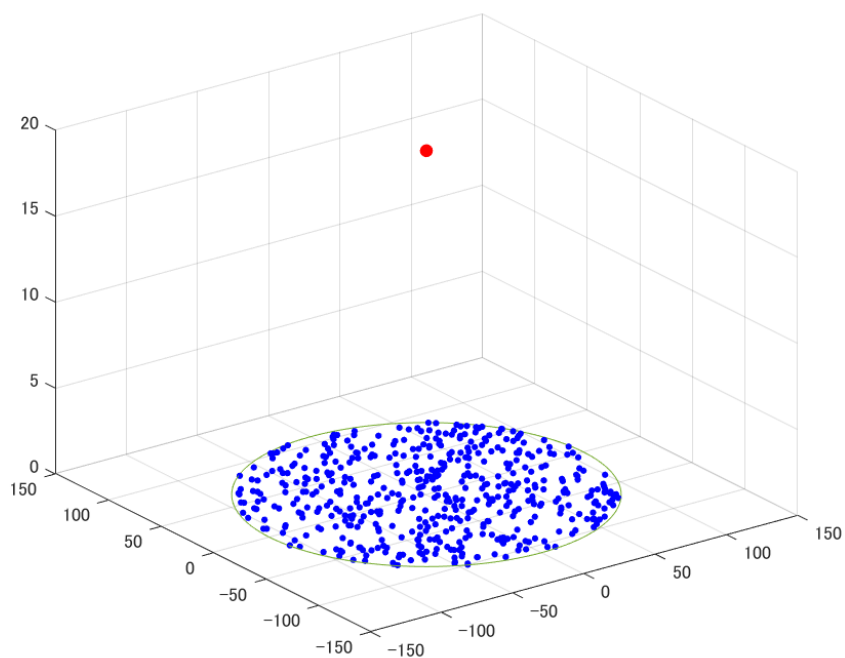


図 3.15 地上局の位置をランダムに生成した結果

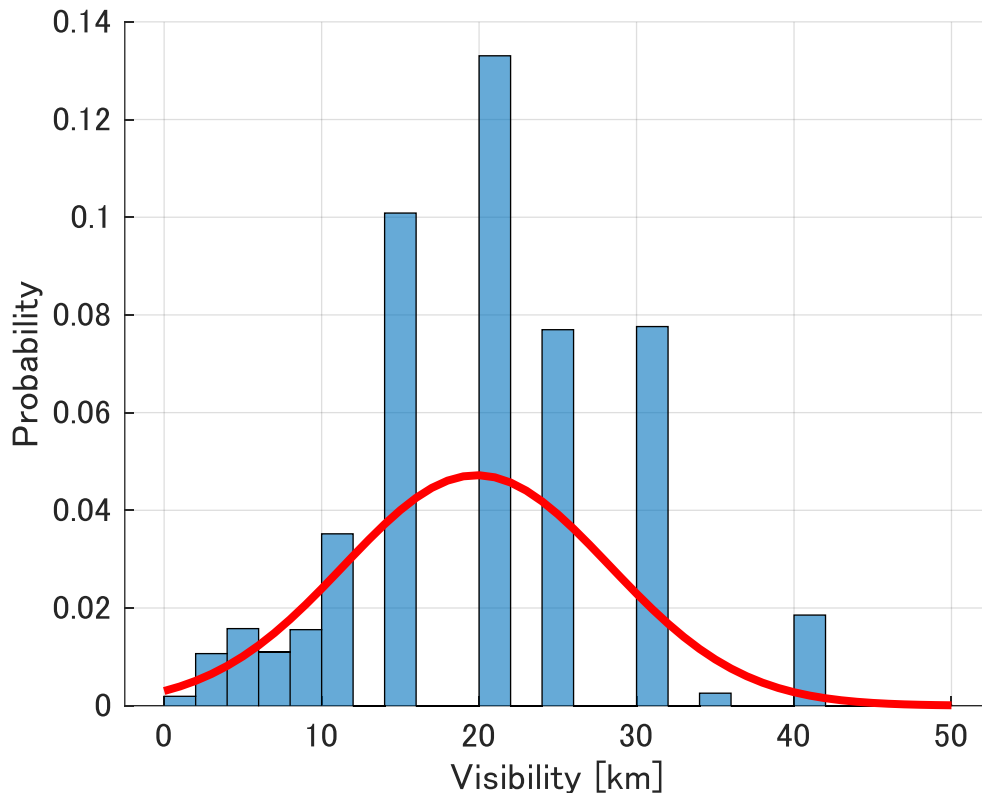


図 3.16 視程の確率密度関数（東京）

3.4.2 BER

第 1 に、光、ミリ波それぞれの領域において BER を測定するシミュレーションを行う。各スロットにおける通信性能を確かめるため、タイムスロットの数は 1 スロットとする。各ユーザのチャネル推定結果に基づきチャネル状態の良いユーザは光、悪いユーザはミリ波に振り分け、それぞれ通信を行う。電力レベルの数は 2 とし、簡単化のため高い電力レベルに割り当てられたユーザを **Strong** ユーザ、低い電力レベルに割り当てられたユーザを **Weak** ユーザとおく。変調方式は NOMA と PDMA をそれぞれ適用した。3.3.4 に置いて述べた電力制御のパラメタ bias は 0.03 に設定し、最大送信電力は 0~50 dBm とした。光領域に割り当てられたユーザの BER の測定結果を図 3.17 に、ミリ波領域に割り当てられたユーザの BER の測定結果を図 3.18 にそれぞれ示す。光領域、ミリ波領域共に送信電力の増加とともに BER が低下しており、**Strong** ユーザの BER の方が **Weak** ユーザよりも低いことが分かる。次に PDMA と NOMA を比較すると、PDMA の方が NOMA よりも BER が高いことが分かる。これは PDMA と NOMA の割当方式の違いによるものと考えられる。NOMA ではチャネル係数が大きいユーザから順に高い電力レベルに割り当てられる。そのため各チャネルにおいて低い電力レベルのユーザよりも高い電力レベルのユーザのチャネル係数が大きくなるため、同一チャネル内で受信電力に差をつけやすい。一方 PDMA は電力レベ

ルが周期的に切り替わるため、チャネル係数が小さいユーザが高い電力レベルに割り当てられることもあり、電力差をつけにくい。具体的な例を挙げると、チャネル係数の大きいユーザが最大送信電力で送信した時の受信電力に比べ、チャネル係数の小さいユーザが最大送信電力で送信した時の受信電力は小さい。そのためチャネル係数の小さいユーザが高い電力レベルに割り当てられた時は電力差をつけにくく、BER が悪化する。そのため NOMA よりも PDMA の方が BER は高くなる。

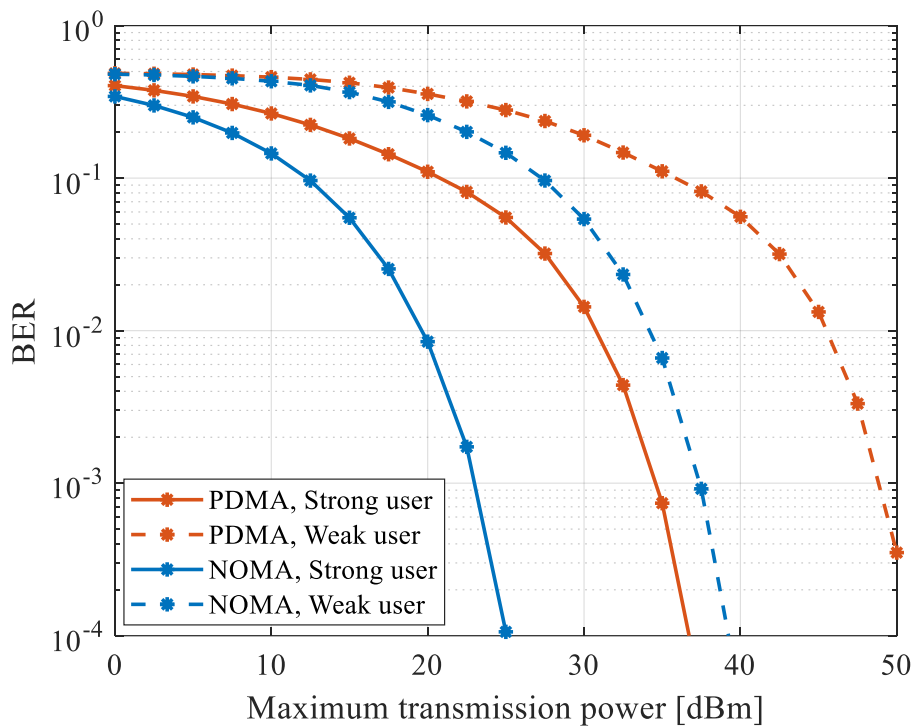


図 3.17 光領域における BER の測定結果

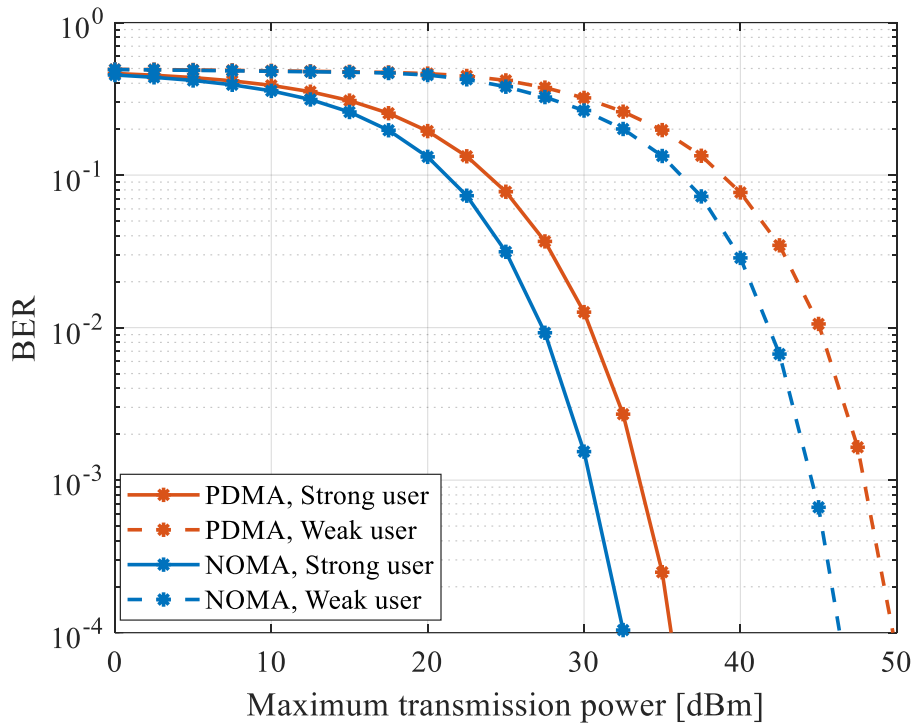


図 3.18 ミリ波領域における BER の測定結果

3.4.3 通信レート

第 2 に、通信レートの比較を行う。シミュレーション条件は BER のシミュレーションと同一である。タイムスロットは 1 スロットとし、各スロットにおける通信レートの差を比較する。多重アクセス方式は PDMA, NOMA, OMA をそれぞれ適用する。電力レベル数は 2, 電力制御における bias は 0.03, 最大送信電力は 0~25 dBm とする。光領域, ミリ波領域における通信レートの測定結果をそれぞれ図 3.19, 3.20 に示す。最大送信電力の増大に伴い、各多重アクセス方式の通信レートも増大していることがわかる。次に PDMA, NOMA, OMA を比較すると、PDMA と NOMA の通信レートは OMA よりも大きいことが分かる。これは電力領域における信号の多重化により、周波数利用効率が向上しているためであると考えられる。一方 PDMA の通信レートは NOMA よりも低いことが分かる。これは 3.3.3 において論じた PDMA における電力効率性の低さに原因があると考えられる。NOMA ではチャンネルの推定結果に基づき、チャンネル係数が良い順に高い電力レベルに割り当てるため、電力効率性が高く、総スループットも大きくなる。一方 PDMA では推定結果に関わらず周期的に電力レベルを切り替えるため、チャンネル係数が悪いユーザが高い電力レベルに割り当てられることもある。先述したように同一の送信電力で送信した場合、チャンネル係数が小さいユーザの受信電力はチャンネル係数が大きいユーザの受信電力よりも小さくなるため、電力効率は低くなる。そのため PDMA の電力効率は NOMA よりも低くなり、スループットも低下する。また Strong ユーザと Weak ユーザの通信レートを比較する

と、PDMA, NOMA 共に大きな差が出ている。この原因は 2.2.2 において述べた通り、受信電力の差によるものであると考えられる。

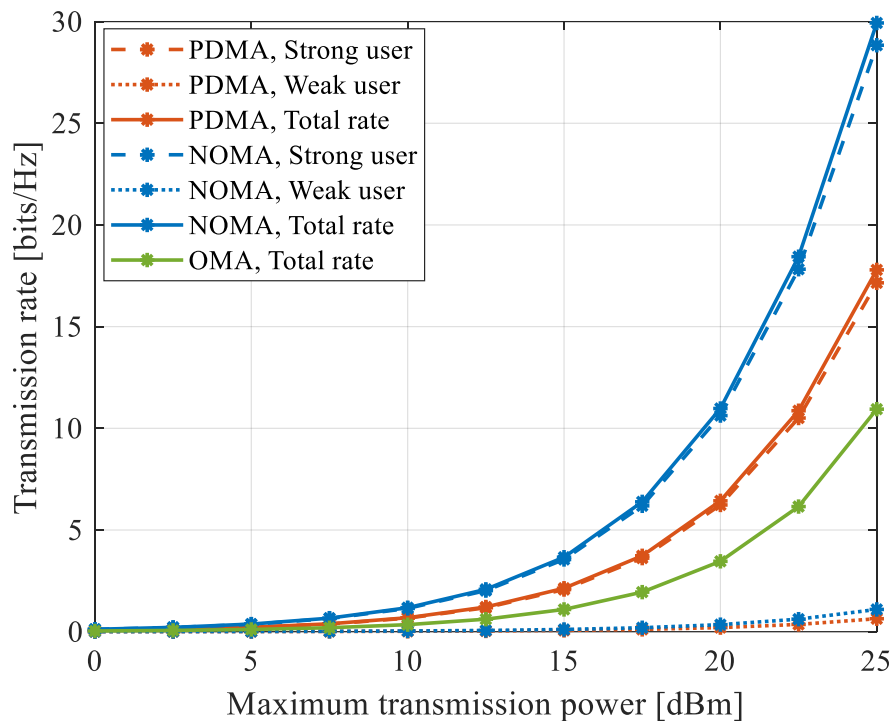


図 3.19 光領域における通信レートの測定結果

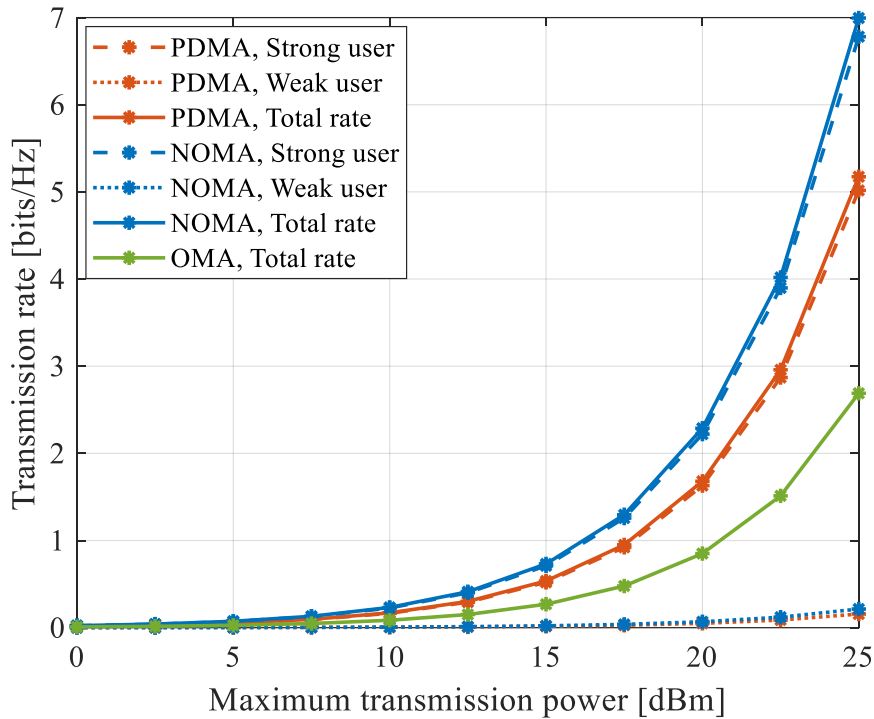


図 3.20 ミリ波領域における通信レートの測定結果

3.4.4 フェアネスインデックス

第 3 に、フェアネスインデックスを比較する。フェアネスインデックスとはユーザ間の公平性を評価する指標であり、次式より求められる[59].

$$f = \frac{(\sum_{i=1}^n R_i)^2}{n \sum_{i=1}^n R_i^2} \quad (3.46)$$

R_i は i 番目のユーザの通信レートを指す。フェアネスインデックスの値は $0 < f < 1$ の範囲内となり、1 に近いほどユーザ間の公平性が保証されていることを示す。シミュレーションではタイムスロット数を 100 とし、各時刻における累計の平均通信レートを基にフェアネスインデックスを測定する。電力レベルは 2 とし、電力制御における bias パラメタは 0.03 とした。また図 3.19, 図 3.20 の結果が示すように、光領域に割り当てられたユーザとミリ波領域に割り当てられたユーザでは通信レートに大きな差が生じる。そのため光領域、ミリ波領域は別々にフェアネスインデックスを計算する。光領域、ミリ波領域それぞれにおける PDMA と NOMA のフェアネスインデックスの測定結果を図 3.21 に示す。3.3.3 で述べたように、NOMA では電力レベルの切り替えを行わず、各ユーザは割り当てられた固定のサブバンド及び電力レベルを使い続ける。そのため各ユーザの各時刻における通信レートは変化せず、フェアネスインデックスも一定となる。一方 PDMA は光領域、ミリ波領域共に時間の経過とともにフェアネスインデックスが大幅に改善していることがわかる。経過したタイムスロット数が少ない段階ではフェアネスインデックスの値は小さく、公平

性は低い。経過したタイムスロット数の増加とともにフェアネスインデックスも増加し、光領域では 0.70、ミリ波領域では 0.85 近くまでフェアネスインデックスが改善している。この理由は 2.2.3 で述べたように、PDMA では各ユーザが全ての電力レベルに均等に割り当てられるため、各ユーザの平均通信レートが近い値になるためである。各時刻における通信レートは図 3.19, 3.20 に示した通り、割り当てられた電力レベルによって大きな差が生じる。しかし割り当てられる電力レベルを切り替えることで、平均通信レートを近い値に制御することができる。また PDMA を適用した場合の光領域、ミリ波領域のフェアネスインデックスを比較すると、ミリ波領域の方が光領域よりも値が大きい、即ち公平性が高いことが分かる。これは光領域とミリ波領域のチャネル特性の違いによるものであると考えられる。3.3.2 において述べたように、光チャネルは雲や大気減衰等により左右されやすく、チャネル係数にも差がつきやすい。チャネル係数が大きいユーザと小さいユーザが同一の電力レベルに割り当てられた時の通信レートを比較すると、送信電力及び干渉電力が同じ値の場合、チャネル係数が大きいユーザの方が通信レートは大きくなる。したがってチャネル係数の大きさに差がつきやすい光領域の方が通信レートにも差がつきやすく、フェアネスインデックスの値は小さくなる。

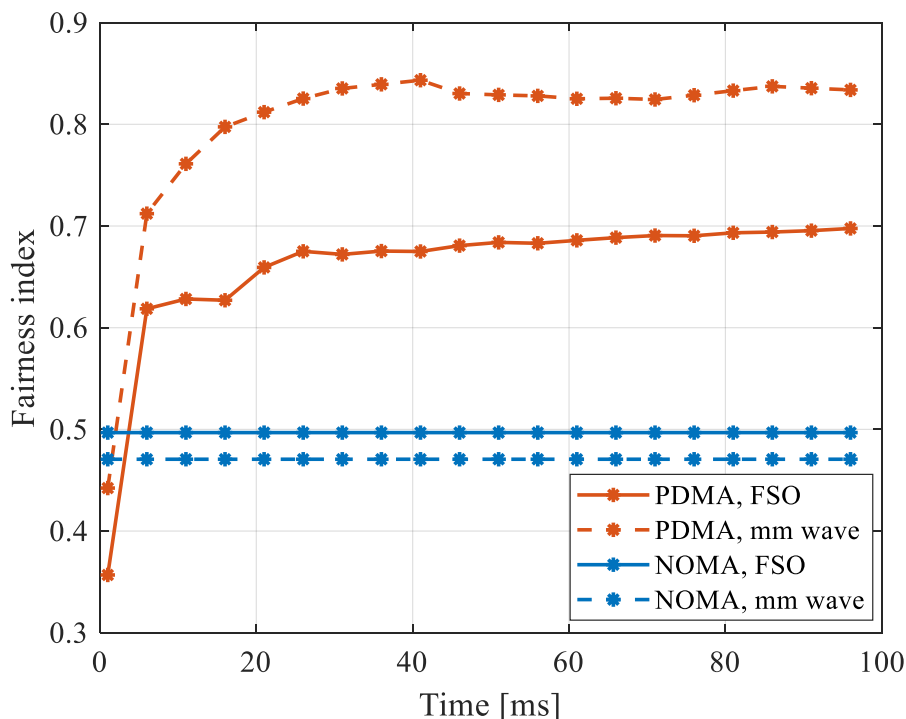


図 3.21 フェアネスインデックスの測定結果

3.4.5 電力制御

次に電力制御のパラメタと通信性能の関係について分析する。3.3.4における電力制御のパラメタ $bias$ は電力レベルが高いユーザと低いユーザの受信電力の間につく電力差を決定する関数である。 $bias$ の値が 1 に近いほど電力レベルが高いユーザと低いユーザの電力差が小さくなり、0 に近いほど電力差が大きくなる。また 3.3.4 で述べた通り、本研究で提案する電力制御方式では、 $bias$ に加えて各ユーザのチャネル係数の推定結果を基に送信電力を決定することでチャネル状態の差を補正する。まず提案した電力制御方式において $bias$ の値を 0.001, 0.01, 0.1 と設定した場合及び、固定電力割当方式において電力割当率を 0.7, 0.3 に設定した場合の Strong user 及び Weak user の BER を図 3.22 に示す。電力レベル数は 2 とし、変調方式は PDMA を採用した。提案した電力制御方式と固定電力割当方式を比較すると、 $bias$ の値が 0.01 及び 0.1 の時は最大送信電力が一定値を超えると Strong user, Weak user 共に提案方式の方が固定電力割当方式よりも BER が低いことが分かる。一方 $bias$ が 0.001 の場合、Strong user の BER は固定電力割り当て方式の BER よりも低いが、Weak user の BER は固定電力割り当て方式よりも高いことが分かる。これらのことから、 $bias$ の値を適切に設定することで、提案方式は固定電力割当方式よりも高い通信精度を実現することができるといえる。また提案方式における各 $bias$ の値を適用した時の結果を比較すると、 $bias$ の値が大きい時は Weak user の BER が低くなり、 $bias$ の値が小さい時は Strong user の BER が低くなっていることが分かる。 $bias$ の値が大きい時は Strong user に対する Weak user の受信電力の値は $bias$ 値が小さい時の値よりも相対的にも大きくなる

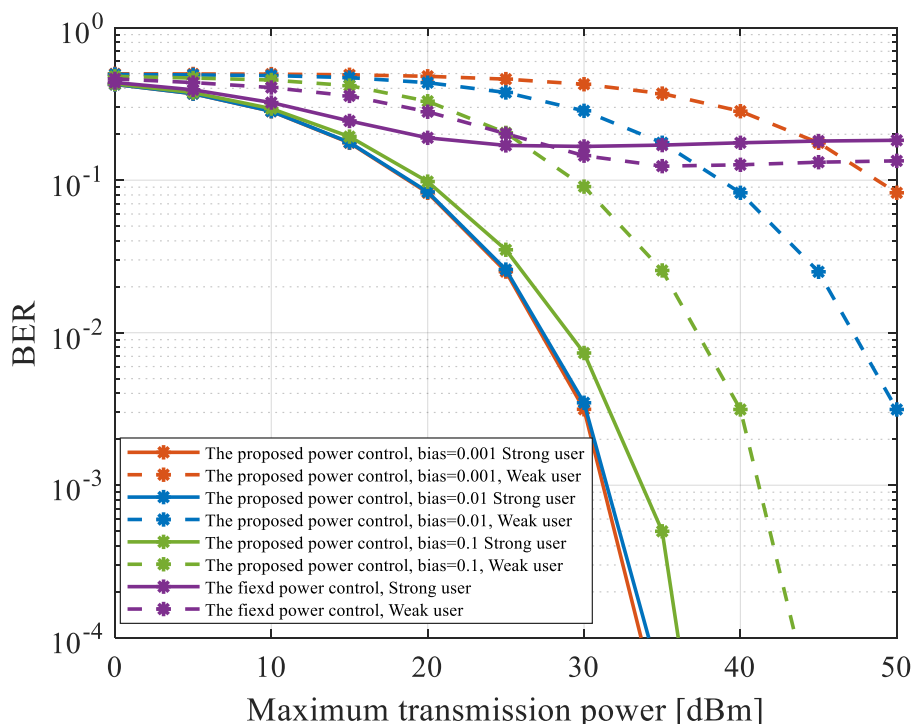


図 3.22 提案した電力制御方式と固定電力割当方式の BER における比較

ため、Strong user の信号を復号する時の干渉信号の電力が大きくなり、Strong user の BER が悪化する。一方 Weak user の受信電力が大きくなるため、Strong user の BER が極端に低い場合を除き、Weak user の BER が向上する。bias の値が小さい時は Strong user に対する Weak user の受信電力が相対的に小さくなる。Strong user の信号を復号する時の干渉電力が小さくなるため、Strong user の BER は向上する。一方 Weak user の受信電力は小さくなるため、Weak user の BER は悪化する。

次に通信レートを比較する。提案方式において bias の値を 0.001, 0.01, 0.1 と設定した場合及び、固定電力割当方式において電力割当率を 0.7, 0.3 に設定した場合の合計通信レートを図 3.23 に示す。提案方式において bias の値が 0.001 及び 0.01 の時は固定電力割当方式よりも通信レートが大きいことが分かる。一方 bias の値が 0.1 の時は固定電力割当方式よりも通信レートは小さくなっている。また提案方式におけるそれぞれの結果を比較すると、bias の値が大きいほどスループットが低下していることわかる。bias の値が大きい時は Weak user に割り当てられる電力が大きくなり、Strong user に割り当てられる電力は小さくなる。したがってチャンネル全体における電力効率も低下し、スループットも低下する。一方 bias の値を小さくした場合、Strong user に割り当てられる電力が大きくなり、スループットが最大化される。一方 Weak user に割り当てられる電力は小さくなるため、Weak user のスループットは低下し、ユーザ間の公平性は低くなる。

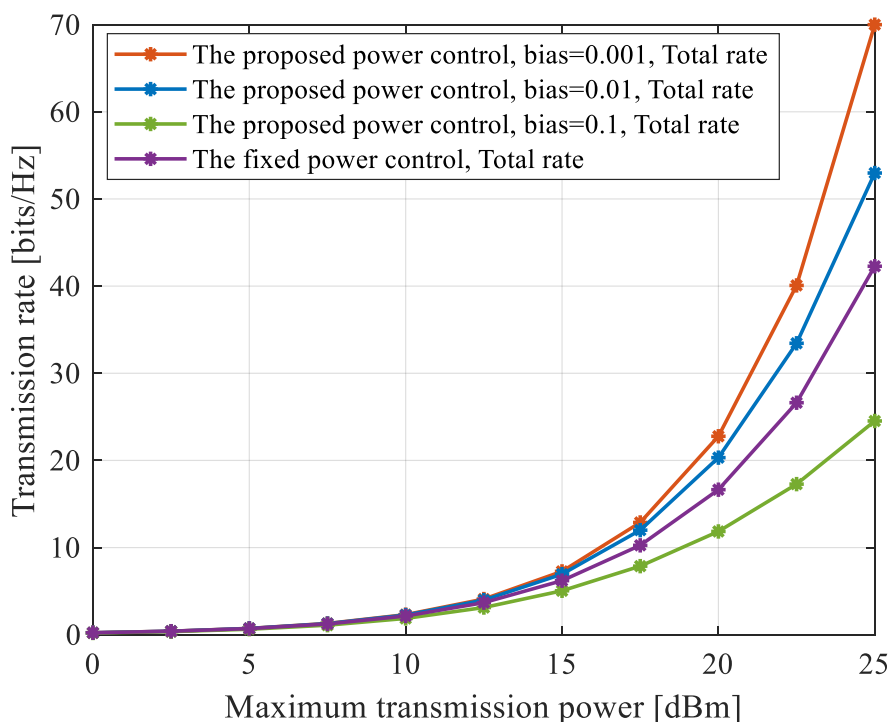


図 3.23 提案した電力制御方式と固定電力割当方式の通信レートにおける比較

電力制御方式について総括する。提案した電力制御方式では各ユーザのチャネル推定の結果を反映しつつ、パラメタ *bias* によってユーザ間の受信電力差を補正することで各ユーザの送信電力を決定する。BER, 通信レートのシミュレーション結果より、提案方式ではパラメタである *bias* の値を適切に設定することで、従来の固定電力割当方式よりも高い通信性能を達成できることが分かった。*bias* の値を大きくすると Weak user の BER 及び通信レートが向上し、ユーザ間の公平性は向上する。一方 Strong user の通信レートは下がり、全体のスループットも低下する。*bias* の値を小さくした場合は Strong user の BER, 通信レートが向上し、全体のスループットも向上する。一方 Weak user のスループット, BER は低下し、ユーザ間の公平性は低くなる。したがって *bias* の値によって通信性能は大きく変化するため、求められる通信要件に応じて値を決めていく必要がある。また本論文において比較は行わないが、最適化計算による電力制御方式の方がオーバーヘッドは大きい通信性能は向上するものと考えられる。したがって最適化法においてオーバーヘッドが少なく、本システムに適用可能な方式についても検討していく必要がある。

3.4.6 小結論

本研究では地上-HAPS 間アップリンク通信において PDMA を適用した新しいシステムを提案した。提案システムには3つの特徴がある。第1に、各ユーザのチャネル状態に応じて光とミリ波を切り変える仕組みを実装した。光通信は電波よりも高速な通信を実現することができるが、雲や大気減衰の影響を強く受けるため、チャネルの状態によっては利用できない。そこで参照信号によりチャネルの状態を推定し、その結果に応じて光とミリ波のいずれかに割り当てる仕組みを導入した。第2に、多重アクセス方式として PDMA を適用した。NOMA は電力領域において信号を多重化することで高速な通信を可能にする。一方電力領域において信号を分離するためには各ユーザの受信電力に大きな差をつける必要があり、通信レートにも差が生じるため、ユーザ間の公平性の観点から問題がある。そこで電力領域における信号の多重化を実装しつつ、各ユーザの電力レベルを周期的に切り替える PDMA を実装した。PDMA では各ユーザが全ての電力レベルに均等に割り当てられるため、平均通信レートが近い値になり、ユーザ間の公平性が確保される。第3に、各ユーザのチャネル状態の差を考慮しつつ、オーバーヘッドの少ない電力制御方式を考案した。光チャネルは変動しやすく、ユーザ毎にチャネル環境は大きく異なる。提案方式ではユーザのチャネル状態の差を考慮しつつ、*bias* というパラメタを使用することでユーザ間の受信電力に差をつける。

シミュレーションでは提案した通信方式を実装しつつ、PDMA, NOMA, OMA の通信性能を比較した。シミュレーション結果より、PDMA を実装した提案方式は OMA よりも高いスループットを達成した。一方 NOMA よりもスループットが低くなった。スループットが NOMA よりも低くなる原因としては、NOMA に比べ電力効率が低い点が挙げられる。

NOMA ではチャンネル係数が高い順にユーザを各電力レベルに割り当てるため、各サブチャンネルにおいて必ずチャンネル状態の良いユーザがより高い電力レベルに割り当てられる。一方 PDMA では周期的に電力レベルが切り替わるため、チャンネル状態の悪いユーザが高い電力レベルに割り当てられることもある。同一の電力レベルにチャンネル状態の良いユーザと悪いユーザが割り当てられた場合、チャンネル状態の良いユーザの方が通信レートは高くなる。したがって電力効率は PDMA の方が低く、スループットは低下する。またユーザ間の公平性を示すフェアネスインデックスは経過するタイムスロットが多いほど良い値になり、NOMA と比較して大幅に改善した。これは PDMA では各ユーザの電力レベルが周期的に切り替えられることで、通信レートが多いタイムスロットと小さいタイムスロットが生じ、各ユーザの通信レートは近い値になるためである。また電力制御に関するシミュレーションでは、パラメタ *bias* の値を適切に設定することで、提案方式は従来の固定電力割当方式よりも高い通信性能を達成できることが分かった。*bias* の値が大きい時は Weak user の受信電力が大きくなるため、Weak user の通信レート及びユーザ間の公平性は向上するが、Strong user の通信レート及び全体のスループットは低下する。反対に *bias* の値が小さい時は Strong user の受信電力が大きくなるため、Strong user の通信レート及び全体のスループットは向上するが、Weak user の通信レート及びユーザ間の公平性は低下する。

以上述べたように、PDMA は NOMA よりもユーザ間の公平性は高くなるが、スループットは低下する。そのため通信要件に応じて 2 つの方式を使い分けるべきであると考えられる。例えば迂回路のあるネットワーク、複数の経路があるネットワーク、バックボーンのネットワーク等においてはユーザ間の公平性よりもスループットが重要であるため、NOMA が適切である。一方ユーザの QoS に直接影響を与える回線やネットワークのエンド部分を担う回線ではユーザ間の公平性も重要な指標の一つであるため、PDMA が適切であると考えられる。図 1.1 に示す通り、地上-HAPS 間の回線は非地上系ネットワークにおいて地上局と直接通信をするエンド部分を担当している。そのためユーザの QoS に直接影響を与える回線であり、ユーザ間の公平性が重要な領域であるといえる。また 2.1.4 に述べた通り、HAPS は携帯端末と直接通信を行うモバイル通信に活用されることも期待されている。このことからユーザ間の公平性は重視すべき指標の 1 つであり、NOMA と併せて PDMA の適用も検討していくべきであると考えられる。提案方式において通信性能を改善する手法としては、先述した電力制御におけるパラメタ *bias* の制御に加え、各ユーザが各電力レベルに割り当てられる確率を制御する手法が有効であると考えられる。先述したように、チャンネル状態の良いユーザと悪いユーザが同じ送信電力でそれぞれ通信を行う環境を想定すると、チャンネル状態の良いユーザの方が受信電力は高くなるため、通信レートが高くなる。したがって PDMA によって各ユーザが全ての電力レベルに均等に割り当てられるように制御した場合であっても、平均通信レートは完全に同じ値にはならず、チャンネル状態の良いユーザの方が通信レートは大きくなる。よってさらにユーザ間の公平性を向上させるためには、チャンネル状態の悪いユーザが高い電力レベルに割り当てられる確率を高める手法が有効である

と考える。即ち電力レベルを周期的に切り替え各ユーザが全電力レベルに割り当てられる確率を一様にするのではなく、ユーザのチャネル状態に応じて各電力レベルに割り当てられる確率を変動させる。チャネル状態の悪いユーザが高い電力レベルに割り当てられる確率を高めた場合、全体のスループットは低下するが、チャネル状態の悪いユーザの通信レートは向上し、ユーザ間の公平性は改善される。反対にチャネル状態の良いユーザが高い電力レベルに割り当てられる確率を高めることで、チャネル状態の良いユーザの通信レートを向上させ、全体のスループットも向上させることができる。この場合チャネル状態の悪いユーザの通信レートは低下するため、ユーザ間の公平性は低下する。よってユーザ間の公平性と全体のスループットのトレードオフを考慮した上で、各ユーザが各電力レベルに割り当てられる確率を制御することで通信要件に合った通信性能を達成する手法についても検討する余地があるといえる。

4. 衛星間通信における NOMA の適用に関する研究

4.1 概要・研究背景

本章では低軌道衛星コンステレーションにおける衛星間通信に着目し、NOMA を適用することで通信性能を向上させるシステムについて提案する。また本章に記載する内容は IEEE International Conference on Communications (ICC) 2021 において発表した内容と重複する部分がある [60]。2.1.3 において述べたように、近年数十から数百基の衛星を組み合わせ構成される低軌道衛星コンステレーションを用いた通信方式が注目されている。低軌道衛星通信には災害時の可用性やネットワーク設計の柔軟性、地理的制約・政治的制約に関わらず通信を提供できる点を始めとした長所がある一方で、地上ネットワークと比較した遅延時間の長さが弱点となっており、普及を妨げる一因となっている [1]。衛星通信の対応できる通信要件の幅を広げ、より様々なサービスに対応できるネットワークとして普及を推進していくためには、遅延時間を抑制する手法を検討していく必要がある。そこで本研究では 5G において活用されている多重アクセス方式である NOMA を衛星間通信に適用することで遅延時間を抑制する手法について提案する。2.2.2 において述べたように、NOMA では同一周波数・時間上で複数の信号を送信し、電力領域において多重化・分離を行うことでより周波数利用効率の高い通信を実現することができる。

2.1.1 において述べたように、低軌道衛星ネットワークは地上-衛星間の通信リンクと衛星間のリンクで構成される。この内本研究で取り扱う衛星間の通信リンクはユーザと直接通信を行うリンクではなく、バックボーンとして機能するリンクである。衛星通信における通信遅延の低減を実現するためには地上-衛星間と衛星間双方において通信性能を向上させる必要がある。1.1 において述べたように、地上-衛星間の通信リンクにおける NOMA の適用については多くの先行研究がある [10][11]。一方で衛星間のリンクにおける NOMA の適用については先行研究が非常に少ない。LED による可視光通信を用いた衛星間通信における NOMA の適用に関する先行研究があるが [61]、当研究は複数の衛星を用いた衛星クラスタにおける衛星間通信を想定しており、低軌道衛星コンステレーションにおける衛星間通信への NOMA の適用については分析されていない。そこで本研究では低軌道衛星コンステレーションにおける衛星間通信への NOMA の適用を研究対象とする。

提案方式の概要について簡単に述べる。システムモデルを図 4.1 に示す。提案方式では衛星をグループ A、グループ B、1 基の中継衛星の 3 つに分割する。グループ A、グループ B はそれぞれ 2 基以上の衛星で構成されるものとする。提案方式ではグループ A からグループ B に向けた通信を想定し、グループ間の通信を中継衛星によって中継しつつ、それぞれの通信に NOMA を適用することでスループットの向上と通信遅延時間の低減を実現する。具体的には、2 つのタイムスロットに分けて通信を行う。1 つ目のタイムスロットでは、グループ A の衛星群から中継衛星への通信にアップリンク NOMA を適用する。即ち複数の衛星から 1 基の中継衛星に向けた通信を同一周波数・時間上で行う。2 つ目のタイ

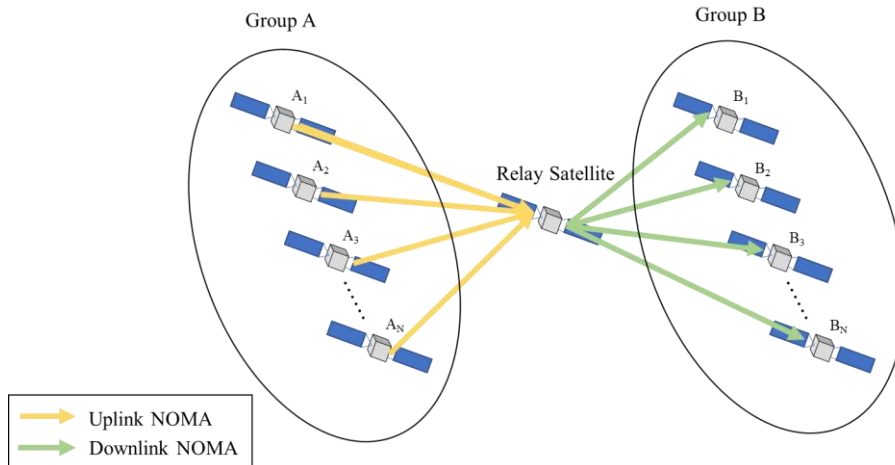


図 4.1 NOMA を適用した衛星間通信システムのモデル (各グループのユーザ数 N 人)

ムスロットでは、中継衛星からグループ B の衛星群への通信にダウンリンク NOMA を適用する。即ち 1 基の中継衛星から複数の衛星群への通信を同一周波数・時間上で行う。詳細な通信手順及び理論式は 4.3 において述べる。

本研究ではシステムモデルを構築した上でシミュレーションにより BER 及び通信レートを測定し、OMA と比較する。さらに NOMA における通信性能は各信号の受信電力の差に大きく依存することから、電力制御方式が非常に重要である。そこで新たな電力制御方式を提案し、従来の方式と比較する。また低軌道衛星コンステレーションにおける衛星間の距離は軌道における衛星の位置に大きく依存するため、衛星の位置によって通信性能も大きく変化することが予想される。そこで衛星が地球を周回する 1 周期中において、提案方式を適用し続ける環境を想定し、通信性能がどのように変化するかを解析する。

4.2 衛星間通信におけるチャネルモデル

本節では衛星間通信に関するシミュレーションを行うにあたって必要な理論式を述べる。なお NOMA に関する理論式については 4.3 において述べる。

4.2.1 低軌道衛星コンステレーションのモデル

本論文では低軌道衛星コンステレーションにおける衛星間通信を題材とする。シミュレーションでは、4.1 に記載したように、衛星が地球を周回する 1 周期中において通信性能がどのように変化するかを検証する。したがって各時刻における低軌道衛星の位置を算出する必要がある。本研究では 2.1.3 に記載した極軌道を採用する。極軌道は北極・南極周辺も含めて地球全体をカバーできる軌道である。i 番目の軌道上の k 番目の衛星の時刻 t における座標は次式より算出される [12].

$$x_{ik}(t) = -R \cos \theta \sin \left(\frac{2\pi i}{P} \right) \sin \left[\omega t + 2\pi \left(\frac{k}{M} + \frac{iF}{PM} \right) \right] + R \cos \left(\frac{2\pi i}{P} \right) \cos \left[\omega t + 2\pi \left(\frac{k}{M} + \frac{iF}{PM} \right) \right] \quad (4.1)$$

$$y_{ik}(t) = R \cos \theta \cos \left(\frac{2\pi i}{P} \right) \sin \left[\omega t + 2\pi \left(\frac{k}{M} + \frac{iF}{PM} \right) \right] + R \sin \left(\frac{2\pi i}{P} \right) \cos \left[\omega t + 2\pi \left(\frac{k}{M} + \frac{iF}{PM} \right) \right] \quad (4.2)$$

$$z_{ik}(t) = R \sin \theta \sin \left[\omega t + 2\pi \left(\frac{k}{M} + \frac{iF}{PM} \right) \right] \quad (4.3)$$

M は各軌道における衛星の数、 N は軌道数を表す。 R は衛星と地球の中心の間の距離、 ω は衛星の軌道角速度、 F は軌道間隔を指す。 θ は衛星の仰角を指し、本論文では極軌道を採用するため90度に設定する。なおその他のパラメタの具体的な値は4.4.1において後述する。また図2.3, 2.4は式(4.1)~(4.3)に基づき作成した図である。

4.2.2 チャネル係数

次にチャネル係数の計算方法について述べる。衛星間通信におけるチャネル係数は次式より計算される[11][62]。

$$g_k(t) = \sqrt{G_T G_R L_T L_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d(t)} \right)^2} \quad (4.4)$$

G_T , G_R は送受信機の利得を表す。 L_T , L_R は送受信機のポインティングロスを示す。 d は送受信機間の距離、 λ は波長を示す。

4.2.3 ドップラーシフト

衛星間に相対速度が存在する場合、ドップラーシフトが発生する。同一軌道内の衛星間は相対速度が0になるためドップラーシフトは発生しない。一方隣接する軌道の衛星間の場合相対速度が発生するため、ドップラーシフトが発生する。詳しくは後述するが、本研究では中継衛星とグループA, Bの衛星の一部は異なる軌道に配置されているものと仮定するため、ドップラーシフトについても考慮する必要がある。

ドップラーシフトを算出するためにはまず相対速度を計算する必要がある。衛星 m と n の間の相対距離及び相対速度のベクトルは次式より算出される。

$$\mathbf{d}_{rel} = \begin{pmatrix} x_m - x_n \\ y_m - y_n \\ z_m - z_n \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

$$\mathbf{v}_{rel} = \begin{pmatrix} v_{xm} - v_{xn} \\ v_{ym} - v_{yn} \\ v_{zm} - v_{zn} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

x_i , y_i , z_i は衛星 i の座標を指す。 v_{xi} , v_{yi} , v_{zi} は衛星 i の速度ベクトルを指す。また \mathbf{d}_{rel} と \mathbf{v}_{rel} のスカラ積は次式より求められる。

$$\mathbf{d}_{rel} \cdot \mathbf{v}_{rel} = |\mathbf{d}_{rel}| |\mathbf{v}_{rel}| \cos \alpha \quad (4.7)$$

α は \mathbf{d}_{rel} と \mathbf{v}_{rel} の間の角度を指す。式(4.5)~(4.7)より、衛星 m と n の間の相対速度は次式より算出される。

$$v_{mn} = |\mathbf{v}_{rel}| \cos \theta = \frac{\mathbf{d}_{rel} \cdot \mathbf{v}_{rel}}{|\mathbf{d}_{rel}|} \quad (4.8)$$

ドップラーシフトは次式より算出される[63].

$$f_d = \frac{v_{mn}f_0}{c} \quad (4.9)$$

f_0 はキャリア周波数, c は光の速度を示す.

式(4.4), (4.9)より, OMA の通信における受信信号は次式より表される.

$$y(t) = g(t)\sqrt{P}xe^{j2\pi f_d(t)t} + n \quad (4.10)$$

x は送信信号, P は送信電力, n は雑音電力を表す.

4.3 NOMA を適用した衛星間通信システムのシステムモデル

4.3.1 システムの概要

本研究では軌道数 18 本, 軌道内衛星数 36 基, 軌道傾斜 90 度の OneWeb と同一のコンステレーションを想定する. さらに 4.1 において述べたシステムについて, グループ A 及びグループ B にそれぞれ 2 基の衛星が配置されている環境を想定する. 各グループの衛星数が 2 基の時のシステムモデルを図 4.2 に示す. グループ A に属する衛星を A_1 , A_2 とおき, グループ B に属する衛星を B_1 , B_2 とおく. また A_1 と B_1 は中継衛星と同一の軌道上に位置しており, A_2 と B_2 は中継衛星が属する軌道の隣接軌道上に位置しているものとする. 4.2.3 において述べたように, 同一軌道上の衛星間, 即ち中継衛星と A_1 及び B_1 との間の距離は衛星が地球を周回する 1 周期中において変化しない. 一方隣接軌道上の衛星間, 即ち中継衛星と A_2 及び B_2 との間の距離は時刻によって変化する.

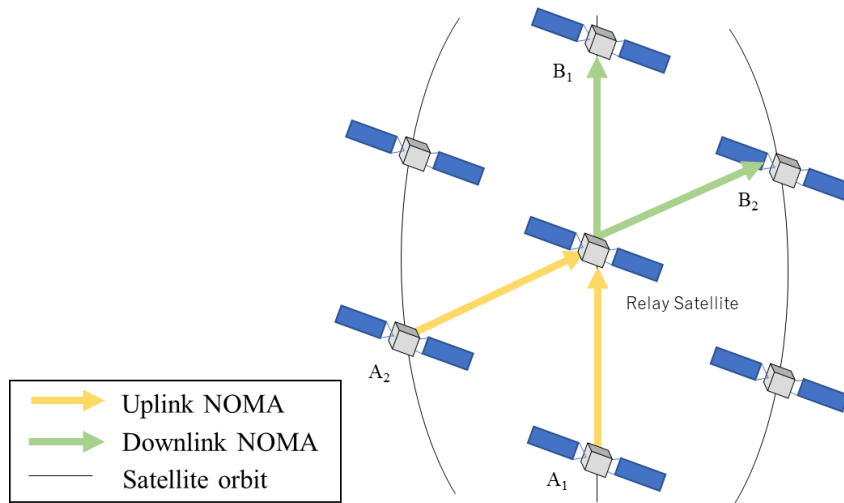


図 4.2 NOMA を適用した衛星間通信システムのモデル (各グループのユーザ数 2 人)

次に通信手順について論じる. 提案方式では衛星間通信に NOMA を活用することでより高速な通信を実現する. 具体的には 4.1 に置いて論じたように, 2 つのタイムスロットに分けて通信を行う. 1 つ目のタイムスロットではアップリンク NOMA により A_1 , A_2 から中継衛星に向けて同一時間・同一周波数上で信号を送信する. 中継衛星は電力領域で多重

化された信号を受信し、SICによりそれぞれの信号を分離・復号する。次に2つ目のタイムスロットではダウンリンク NOMAにより、中継衛星から B_1 , B_2 に向けて同一周波数・時間上で信号を送信する。まず中継衛星は B_1 宛の信号と B_2 宛の信号を電力領域で多重化し、単一のビームで B_1 , B_2 に向けて送信する。 B_1 , B_2 は多重化された信号を受信し、SICにより自身に宛てられた信号を復号する。各タイムスロットにおける詳細な理論式は 4.3.2, 4.3.3 において述べる。

4.3.2 1番目のタイムスロットにおける理論式（アップリンク NOMA）

1番目のタイムスロットでは A_1 , A_2 から中継衛星に向けて同一時間・周波数上で信号を送信する。アップリンク NOMA の理論式は 2.2.2 において述べた通りであるが、本研究では衛星間のドップラーシフトを考慮する必要がある。式(2.1), (4.10)より中継衛星の受信信号は次式より表される[10].

$$y_R(t) = g_{A_1}(t) \sqrt{P_{A_1}} x_{A_1} e^{j2\pi f_{d_{A_1}}(t)t} + g_{A_2}(t) \sqrt{P_{A_2}} x_{A_2} e^{j2\pi f_{d_{A_2}}(t)t} + n \quad (4.11)$$

x_{A_1} , x_{A_2} は A_1 , A_2 の送信信号, P_{A_1} , P_{A_2} は A_1 , A_2 の送信電力を指す。 g_{A_1} , g_{A_2} は式(4.4)により計算される中継衛星- A_1 ・ A_2 間のチャネル係数を表す。 $f_{d_{A_1}}$, $f_{d_{A_2}}$ は式(4.9)により算出される中継衛星- A_1 ・ A_2 間に生じるドップラーシフトを指す。なお便宜上 f_{d_1} , f_{d_2} とそれぞれ変数を設定したが、先述したように中継衛星- A_1 間では相対速度は生じないため、ドップラーシフトの値は 0 となる。また NOMA では電力領域において信号を多重化・分離するため、受信電力に差を着ける必要がある。詳細は後述するが、本研究で取り扱うコンステレーションでは 1 周期中において同一軌道上の衛星間よりも隣接軌道上の衛星間の方が衛星間距離の短い時間帯が長くなる。即ち中継衛星- A_1 間よりも中継衛星- A_2 間の方が衛星間距離の短い確率が高くなる。したがって A_2 を Strong user, A_1 を Weak user とする。よって $g_{A_1}(t) \sqrt{P_{A_1}} e^{j2\pi f_{d_{A_1}}(t)t} < g_{A_2}(t) \sqrt{P_{A_2}} e^{j2\pi f_{d_{A_2}}(t)t}$ となるように送信電力を設定する。また 1 番目のタイムスロットにおける中継衛星の復号手順を図 4.3 に示す。復号手順は 2.2.2 において述べた通りであり、受信側の中継衛星は多重化された A_1 ・ A_2 の信号を受信し、最初に Strong user である A_2 の信号を復号する。次に A_2 の信号を再変調し受信信号から引く。 A_2 の信号を除去した信号から A_1 の信号を復号する。式(2.2), (2.3)より, A_1 , A_2 の信号の SINR は次式より表される[1].

$$SINR_{A_2 \rightarrow R}(t) = \frac{|g_{A_2}(t) e^{j2\pi f_{d_{A_2}}(t)t}|^2 P_{A_2}}{|g_{A_1}(t) e^{j2\pi f_{d_{A_1}}(t)t}|^2 P_{A_1} + \sigma_n^2} \quad (4.12)$$

$$SINR_{A_1 \rightarrow R}(t) = \frac{|g_{A_1}(t) e^{j2\pi f_{d_{A_1}}(t)t}|^2 P_{A_1}}{\sigma_n^2} \quad (4.13)$$

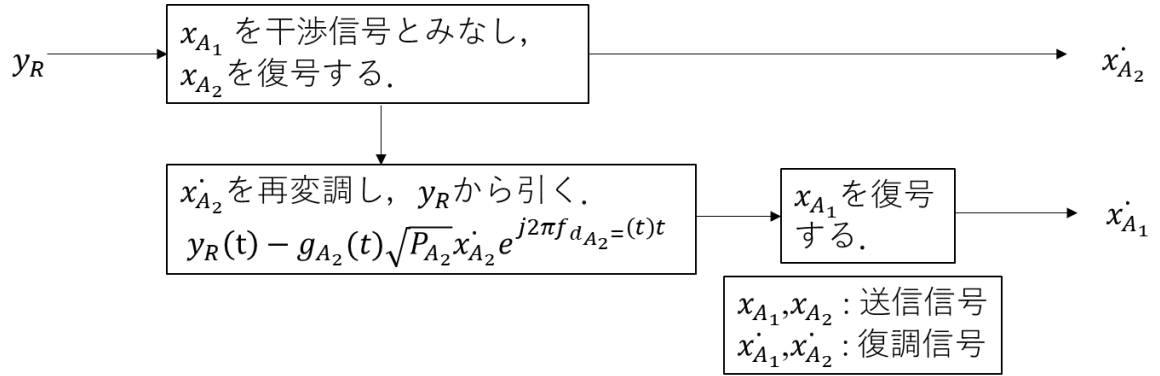


図 4.3 1 番目のタイムスロットにおける復調手順（アップリンク NOMA）

4.3.3 2 番目のタイムスロットにおける理論式（ダウンリンク NOMA）

2 番目のタイムスロットでは，ダウンリンク NOMA により中継衛星から B_1 , B_2 に向けて同一周波数・時間上で信号を送信する．送信側の中継衛星は B_1 , B_2 宛の信号を多重化し，1 つのビームによって B_1 , B_2 へ送信する．受信側の B_1 , B_2 は SIC により自身の復号を分離・復号する． B_1 , B_2 における受信信号は次式より表される．

$$y_{B_1}(t) = g_{B_1}(t)e^{j2\pi f_{d_{B_1}}(t)t} \left(\sqrt{P_{B_1}}x_{B_1} + \sqrt{P_{B_2}}x_{B_2} \right) + n \quad (4.14)$$

$$y_{B_2}(t) = g_{B_2}(t)e^{j2\pi f_{d_{B_2}}(t)t} \left(\sqrt{P_{B_1}}x_{B_1} + \sqrt{P_{B_2}}x_{B_2} \right) + n \quad (4.15)$$

x_{B_1} , x_{B_2} は B_1 , B_2 宛の送信信号， P_{B_1} , P_{B_2} は B_1 , B_2 宛の信号の送信電力を指す． g_{B_1} , g_{B_2} は式(4.4)により計算される中継衛星- B_1 ・ B_2 間のチャネル係数， $f_{d_{B_1}}$, $f_{d_{B_2}}$ は式(4.9)より算出される中継衛星- B_1 ・ B_2 間のドップラーシフトを表す．ダウンリンク NOMA の場合，チャネル状態の悪いユーザの信号の電力を大きく設定する必要がある．そのため中継衛星と同一の軌道に位置する B_1 を Strong user，異なる軌道に位置する B_2 を Weak user に設定する．よって $\sqrt{P_{B_1}} > \sqrt{P_{B_2}}$ となるように送信電力を設定する．2 番目のタイムスロットにおけるダウンリンク NOMA の復号手順を図 4.4 に示す． B_1 は B_2 の信号を干渉信号とみなし， B_1 の信号を直接復号する． B_2 は自身の信号よりも B_1 の方が受信電力は大きいため，最初に B_2 の信号を干渉信号とみなし， B_1 の信号を復号する．次に B_1 の信号を再度変調し，受信信号から引く． B_1 の信号を取り除いた信号から B_2 の信号を復号する． B_1 , B_2 の SINR はそれぞれ次式より表される．

$$SINR_{R \rightarrow B_1}(t) = \frac{|g_{B_1}(t)e^{j2\pi f_{d_{B_1}}(t)t}|^2 P_{B_1}}{|g_{B_1}(t)e^{j2\pi f_{d_{B_1}}(t)t}|^2 P_{B_2} + \sigma_n^2} \quad (4.16)$$

$$SINR(t) = \frac{|g_{B_2}(t)e^{j2\pi f_{d_{B_2}}(t)t}|^2 P_{B_2}}{\sigma_n^2} \quad (4.17)$$

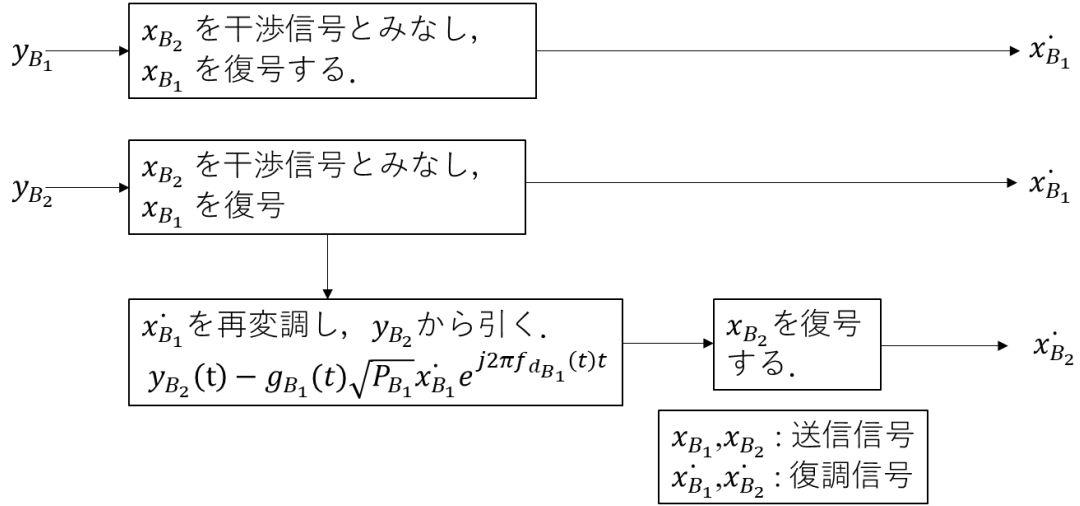


図 4.4 2 番目のタイムスロットにおける復調手順 (ダウンリンク NOMA)

4.3.4 各ルートの通信レート

提案方式では A_1 , A_2 から中継衛星を介して B_1 , B_2 にデータを送信する. 各ルートの通信レートは通信レートが最小のリンクの通信レートに左右される. したがって A_1 - B_1 , A_1 - B_2 , A_2 - B_1 , A_2 - B_2 の通信レートは次式より表される [39].

$$R_{A_1 \rightarrow B_1}(t) = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \min \left(\text{SINR}_{A_1 \rightarrow R}(t), \text{SINR}_{R \rightarrow B_1}(t) \right) \right) \quad (4.18)$$

$$R_{A_1 \rightarrow B_2}(t) = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \min \left(\text{SINR}_{A_1 \rightarrow R}(t), \text{SINR}_{R \rightarrow B_2}(t) \right) \right) \quad (4.19)$$

$$R_{A_2 \rightarrow B_1}(t) = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \min \left(\text{SINR}_{A_2 \rightarrow R}(t), \text{SINR}_{R \rightarrow B_1}(t) \right) \right) \quad (4.20)$$

$$R_{A_2 \rightarrow B_2}(t) = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \min \left(\text{SINR}_{A_2 \rightarrow R}(t), \text{SINR}_{R \rightarrow B_2}(t) \right) \right) \quad (4.21)$$

本研究では 2 つのタイムスロットに分割して通信を行っているため, 各式に $\frac{1}{2}$ を乗じている. 本モデルの合計通信レートは次式より算出できる.

$$R_{total}(t) = R_{A_1 \rightarrow B_1}(t) + R_{A_1 \rightarrow B_2}(t) + R_{A_2 \rightarrow B_1}(t) + R_{A_2 \rightarrow B_2}(t) \quad (4.22)$$

4.3.5 電力制御方式

4.1 において論じた通り, NOMA では Strong user の信号を復号する際に Weak user の信号を干渉信号とみなす. したがってユーザの受信電力に大きな差がつくよう各ユーザの送信電力を設定する必要がある. また Weak user の受信電力が極端に小さい場合も信号を復号することができないため, 両ユーザの通信性能のトレードオフを考慮した上で送信電力を決定する必要がある. 3.3.4 で述べた地上-HAPS 間通信ではフェージングや大気減衰が発

生するが、衛星間通信ではそれらは発生しない。さらに衛星間の距離は時刻や衛星の位置によって変化するため、その変化に応じて送信電力を最適化する方式が必要である。そこで本論文ではチャンネル状態の変化に対応して送信電力を決定するアルゴリズムを提案する。

提案方式では、各リンクの目標通信レートを予め設定した上で、その通信レートを達成できるように送信電力を決定する。目標通信レートを達成するために必要な SINR の値は次式より表される。

$$SINR_{thi} = 2^{2R_{Ti}} - 1 \quad (4.23)$$

R_{Ti} はリンク i の目標通信レートを表す。式(4.12), (4.13), (4.16), (4.17), (4.23)より、目標通信レートを達成するための各ユーザの送信電力は次式より表される。

$$P'_{A_1} = \frac{\sigma_n^2}{|g_{A_1}(t)e^{j2\pi f_{d_{A_1}}(t)t}|^2} SINR_{thA_1} \quad (4.24)$$

$$P'_{A_2} = \frac{|g_{A_1}(t)e^{j2\pi f_{d_{A_1}}(t)t}|^2 P'_{A_1} + \sigma_n^2}{|g_{A_2}(t)e^{j2\pi f_{d_{A_2}}(t)t}|^2} SINR_{thA_2} \quad (4.25)$$

$$P'_{B_1} = \frac{|g_{B_1}(t)e^{j2\pi f_{d_{B_1}}(t)t}|^2 P'_{B_2} + \sigma_n^2}{|g_{B_1}(t)e^{j2\pi f_{d_{B_1}}(t)t}|^2} SINR_{thB_1} \quad (4.26)$$

$$P'_{B_2} = \frac{\sigma_n^2}{|g_{B_2}(t)e^{j2\pi f_{d_{B_2}}(t)t}|^2} SINR_{thB_2} \quad (4.27)$$

時刻から各衛星の位置は算出可能であるため、利得やポインティングロス等の各パラメタが既知の場合、各リンクの距離、チャンネル係数、ドップラーシフトを計算することができる。したがって各リンクの目標通信レート R_{Ti} を設定することで、式(4.24)~(4.27)より目標通信レートを達成するための各衛星の送信電力を算出することができる。また各リンクの目標通信レートは別々に設定できるため、より柔軟な制御が可能となる。例えばトラフィック要求の多い地域の衛星間リンクの通信レートを他のリンクより大きくするといったことも可能となる。本研究ではこの提案した電力制御方式と固定電力割当方式を比較し、性能を検証する。

4.4 結果・考察

4.4.1 シミュレーション条件

本節では 4.3 において述べたシステムに関するシミュレーションを行い、NOMA を実装した提案方式と TDMA を実装した従来方式を比較する。シミュレーションの各種パラメタを表 4.1 に示す。軌道に関するパラメタは OneWeb に用いられている値を参考にしている [16][64][65]。シミュレーションでは BPSK 信号をアップリンク NOMA により衛星 A_1 , A_2

から中継衛星へ、ダウンリンク NOMA により中継衛星から B_1 , B_2 へ送信し、BER, 通信レートといった性能を測定する。また 4.3.5 において述べた電力制御方式を実装し、固定電力割当方式と比較する。

また 4.3.1 において述べた通り、同一軌道内の衛星との衛星間距離は変化しないが、隣接軌道の衛星との衛星間距離は変化する。表 4.1 に示した環境下において、1 周期中における同一軌道の隣接衛星との衛星間距離（中継衛星- A_1 , B_1 ）及び隣接軌道の隣接衛星との衛星間距離（中継衛星- A_2 , B_2 ）を計算した結果を図 4.5 に示す。計算結果より、同一軌道の隣接衛星との衛星間距離は変化していないことが分かる。一方隣接軌道の隣接衛星との衛星間距離は変化している。2500, 5800 s 付近では衛星が赤道面上空に位置しているため、衛星間距離が最長となっている。一方 1000, 4200 s 付近では衛星が北極・南極付近に位置しており、衛星間距離が最短となっている。シミュレーションでは衛星の位置を周期に従い変化させ、通信性能に与える影響を分析する。

表 4.1 シミュレーションパラメタ (NOMA を適用した衛星間通信システム)

項目	値
軌道数	18 本
軌道内衛星数	36 基
衛星高度	1200 km
軌道傾斜	90 度 (極軌道)
軌道周期	6315 s
周波数	30 GHz
変調方式	BPSK+NOMA
送受信機の利得	30 dB
送受信機のポインティングロス	0 dB

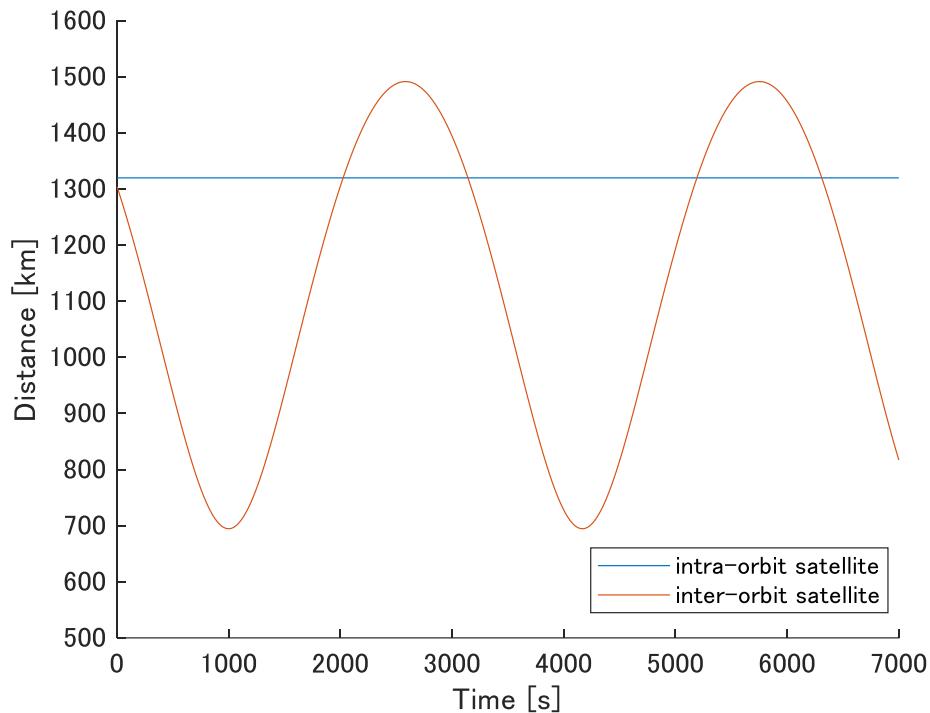


図 4.5 同一軌道の隣接衛星及び隣接軌道の隣接衛星との衛星間距離

4.4.2 最大送信電力-通信レート，スループットに関するシミュレーション

本シミュレーションでは衛星が北極または南極付近に位置している状況を想定し，BER及び通信レートを測定する．即ち衛星間距離は固定する．送信電力を0~50 dBmの間で変化させ，固定電力割当方式を適用する．電力割当率は0.7と0.3に設定する．変調方式はNOMA及びTDMAを適用し， A_1-B_1 ， A_1-B_2 ， A_2-B_1 ， A_2-B_2 の各ルートの通信性能を測定する．BERの測定結果を図4.6に示す．NOMAは電力領域において多重化をしているため干渉電力が増加する．したがって提案方式のBERはTDMAよりも高い．しかし送信電力が30dBmを超えると，全ルートでBERは 10^{-3} を達成している．したがって提案方式は一定の通信精度を達成できるといえる．次に通信レートのシミュレーション結果を図4.7に示す．まずNOMAとOMAの合計通信レートを比較すると，NOMAの方が大幅に大きく，より高速な通信を実現できているといえる．また各ルートの通信レートを比較すると， A_1-B_2 の通信レートが最も大きいことが分かる．また今回のシミュレーションでは A_1-B_2 のルートがBER，通信レート共に最も優れていたが，電力制御のパラメタや衛星間距離，測定するタイミングを変えることで異なる結果が得られると考える．

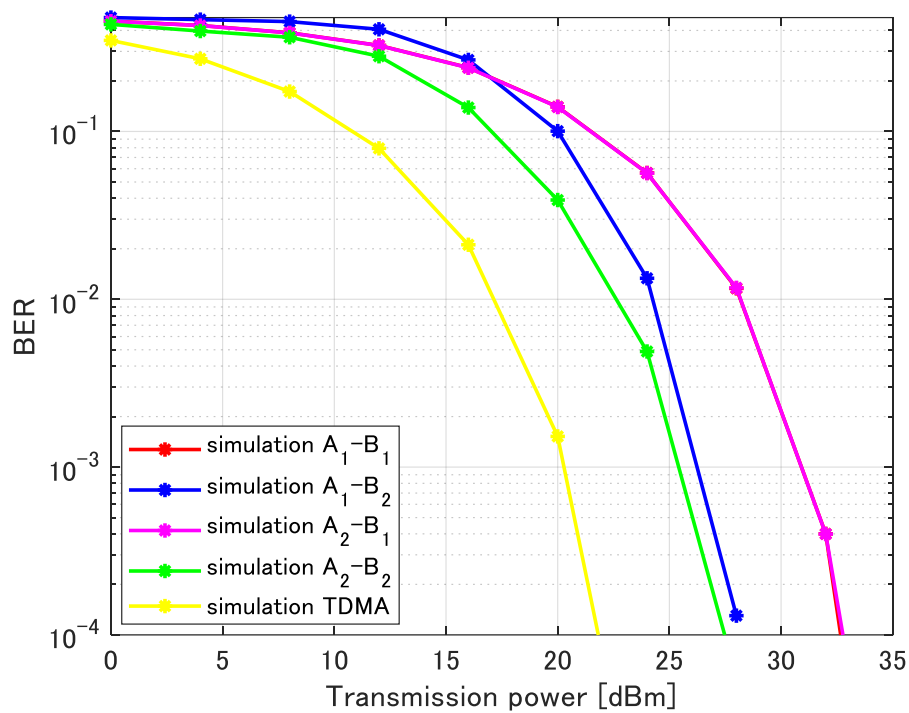


図 4.6 衛星間距離を固定させた際の BER のシミュレーション結果

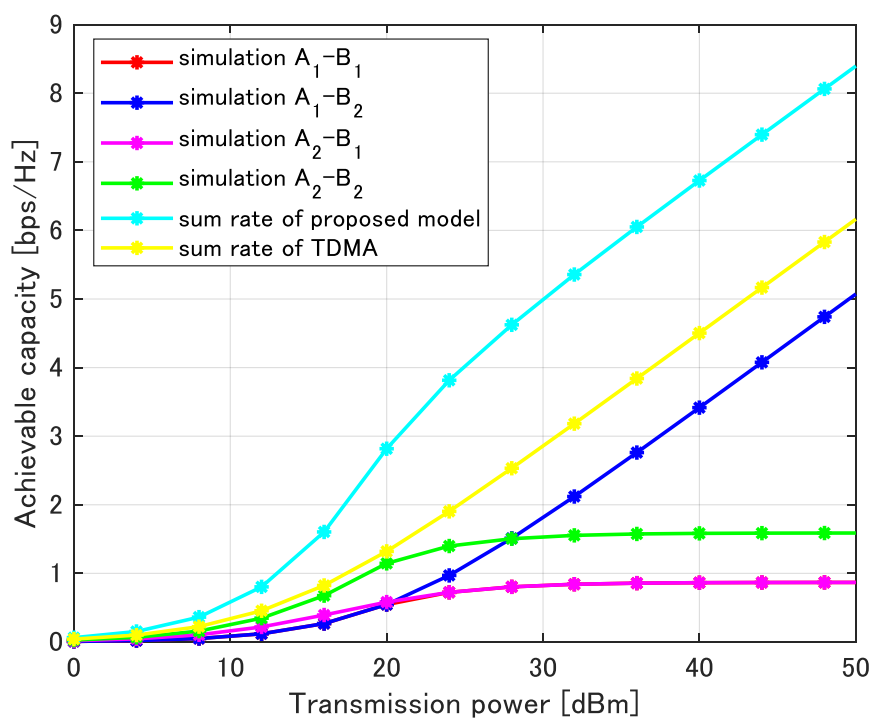


図 4.7 衛星間距離を固定させた際の通信レートのシミュレーション結果

4.4.3 衛星 1 周期における BER 及び通信レート

次に対象とする衛星群が地球を周回する環境を想定し、通信性能の変化を測定する。即ち衛星間距離は図 4.5 のように変化する。固定電力割当方式を採用し、電力割当率は 0.75 と 0.25 する。送信電力は 45 dBm とする。各ルートの BER の測定結果を図 4.8 に示す。図 4.5 に示した衛星間距離の変化に伴い、BER も変動していることが分かる。具体的には、時刻 1000 s 及び 4200 s 付近においてルート A_1-B_2 、 A_2-B_2 の BER が低くなっていることが分かる。4.4.1 に置いて論じたように、時刻 1000、4200 s 付近では衛星群が北極・南極付近に位置しているため、中継衛星- A_2 、 B_2 間の距離が最小となる。一方中継衛星- A_1 、 B_1 間の距離は一定である。したがって 1 番目のタイムスロットにおける A_2 が送信する信号の受信電力及び 2 番目のタイムスロットにおける B_2 が受信する信号の受信電力が大きくなる。よってリンク A_2 -中継衛星、中継衛星- B_2 の BER が低下するため、ルート A_1-B_2 、 A_2-B_2 の BER が低くなる。一方中継衛星- A_2 、 B_2 間の距離が最大となる時刻 2500、5800s 付近ではリンク A_2 -中継衛星、中継衛星- B_2 の BER が高くなるため、ルート A_1-B_2 、 A_2-B_2 の BER が高くなる。また A_1-B_1 、 A_2-B_1 の BER は改善していない。これは中継衛星- A_1 、 B_1 の衛星間距離及び $B_1 \cdot B_2$ の電力割当率が変動しないことにより、リンク A_1 -中継衛星、中継衛星- B_1 の BER が改善しないためであると考えられる。

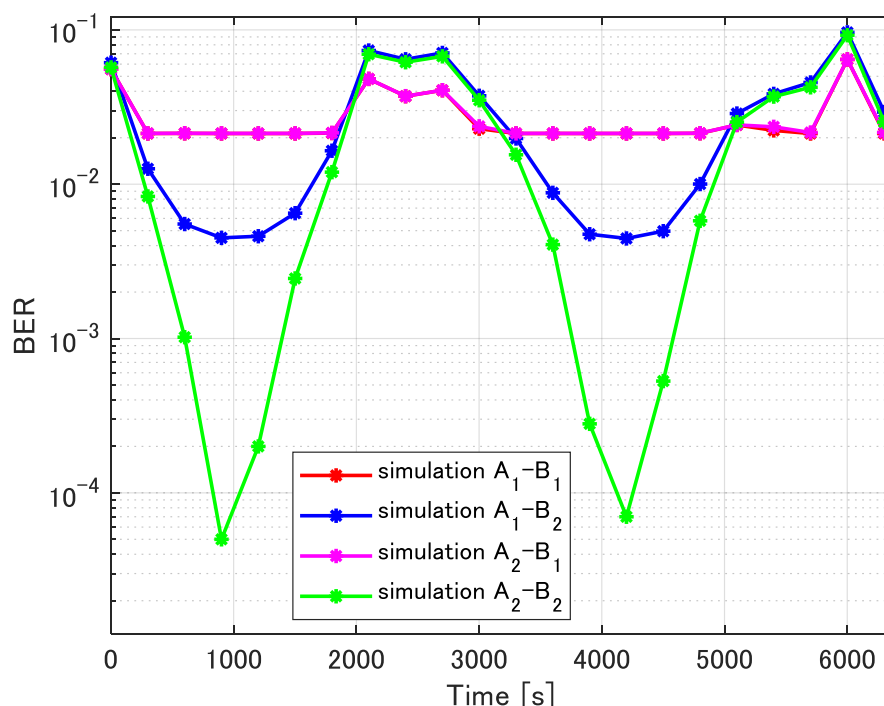


図 4.8 衛星の 1 周期における BER の測定結果

次に提案方式における各ルートの通信レート及び NOMA と TDMA をそれぞれ適用した場合の合計通信レートを図 4.9 に示す。電力割当は固定電力割当方式を適用した。まず各ルートの通信レートを比較すると、BER 同様衛星間距離に応じて通信レートが変動していることがわかる。中継衛星- A_2 、 B_2 間の距離が最小となる時刻 1000、4200 s 付近ではリンク A_2 -中継衛星、中継衛星- B_2 の受信電力が大きくなるため、通信レートが向上する。よってルート A_1 - B_2 、 A_2 - B_2 の通信レートが向上している。一方ルート A_1 - B_1 、 A_2 - B_1 の通信レートは BER と同様変化していない。次に NOMA と TDMA の合計通信レートを比較すると、NOMA を適用した提案方式の方が大幅に通信レートは大きいことが分かる。このことから NOMA では電力領域における多重化により周波数利用効率が改善されており、通信レートの向上が実現可能であるといえる。

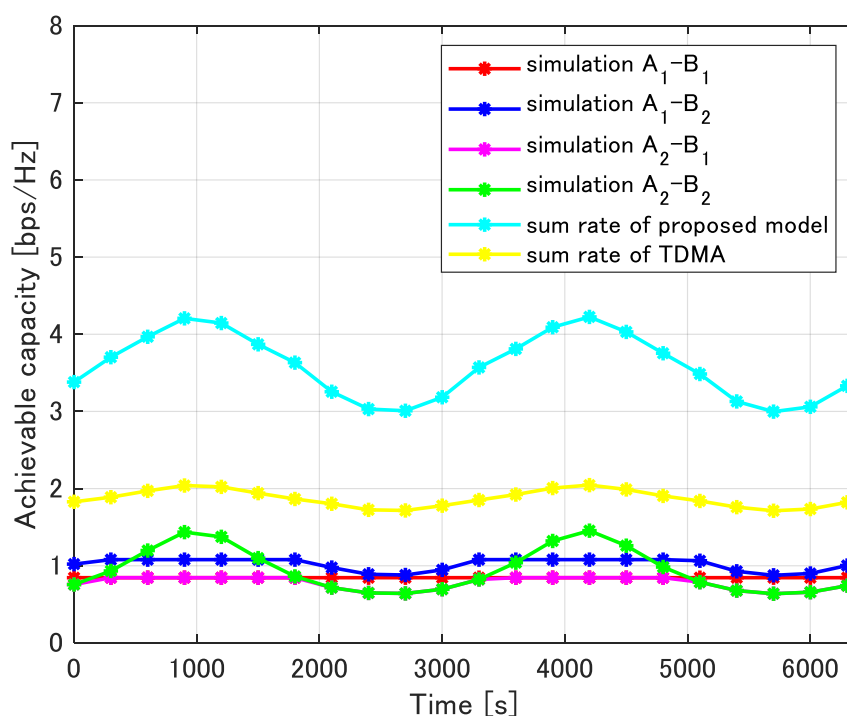


図 4.9 衛星の 1 周期における通信レートの測定結果

4.4.4 電力制御方式に関するシミュレーション

4.4.3 において示した結果より、衛星間距離が変動する影響を受けるため、固定電力割当方式では通信性能が安定しないことが分かった。そのため衛星間距離の変動も考慮した電力制御方式が必要である。そこで本シミュレーションでは 4.3.5 において提案した電力制御方式の性能を解析する。提案方式では衛星間距離が事前に計算可能であることを利用し、目標通信レートから送信電力を計算する。まず A_2 と中継衛星の間の距離を 700 km に固定し、 A_1 と中継衛星の間を 100~2000 km の範囲で変動させた環境を想定し、 A_1 の送信電力

を提案した電力制御方式より計算した結果を図 4.10 に示す。目標通信レートは 1, 3, 5 bps/Hz に設定する。A₁ の送信電力は式(4.24)より計算する。なお本シミュレーションは電力制御方式の性能を検証することを目的としているため、シミュレーションで設定した中継衛星-A₁、A₂ の衛星間距離は実際の値ではなく仮想の値である。結果より、A₁ と中継衛星の間の距離が増大するほど A₁ の送信電力が大きくなっていることが分かる。また目標通信レートが大きいくほど必要な送信電力も大きくなっている。

次に A₁ と中継衛星の間の距離を 1300 km に固定し、A₁ と中継衛星の間を 100~2000 km の範囲で変動させた環境を想定し、A₂ の送信電力を提案した電力制御方式より計算した結果を図 4.11 に示す。A₂ の送信電力は式(4.25)より計算する。図 4.10 と同様、衛星間距離の増大及び目標通信レートの増大に伴い、A₂ の送信電力は大きくなっていることが分かる。また図 4.10 と 4.11 を比較すると、A₂ の方が A₁ よりも必要な送信電力が大幅に大きいことが分かる。これは A₂ が NOMA における Strong user に設定されているため、必要な送信電力が大きくなることによるものと考えられる。なお本方式では通信レートが一定となるように送信電力が制御されるため、各リンクの通信レート及び BER の値は一定となった。

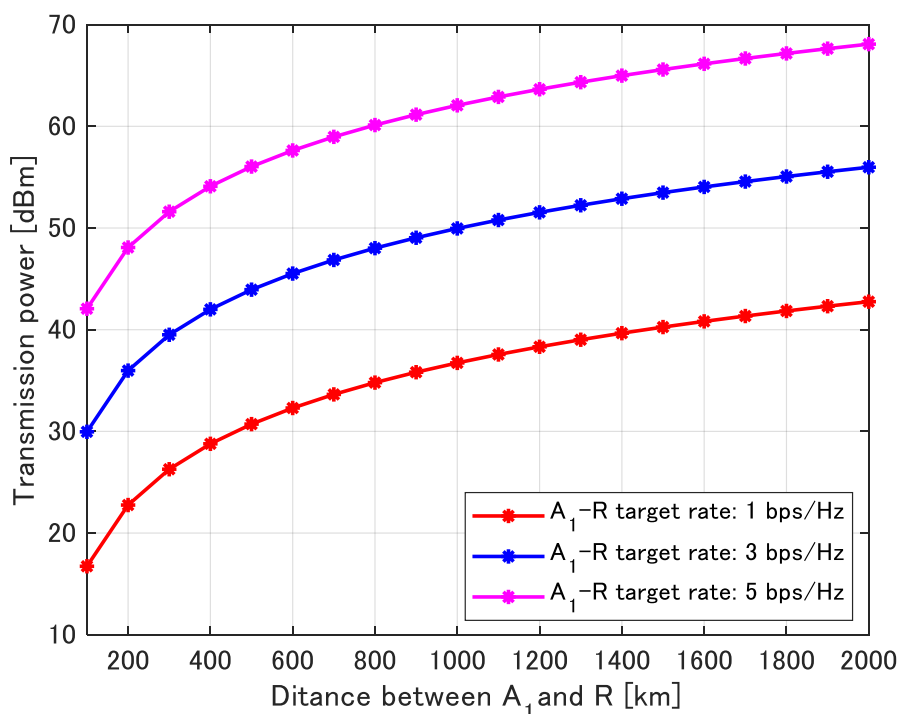


図 4.10 提案電力制御方式において中継衛星-A₁間の衛星間距離を変化させた時の A₁ の送信電力の計算結果

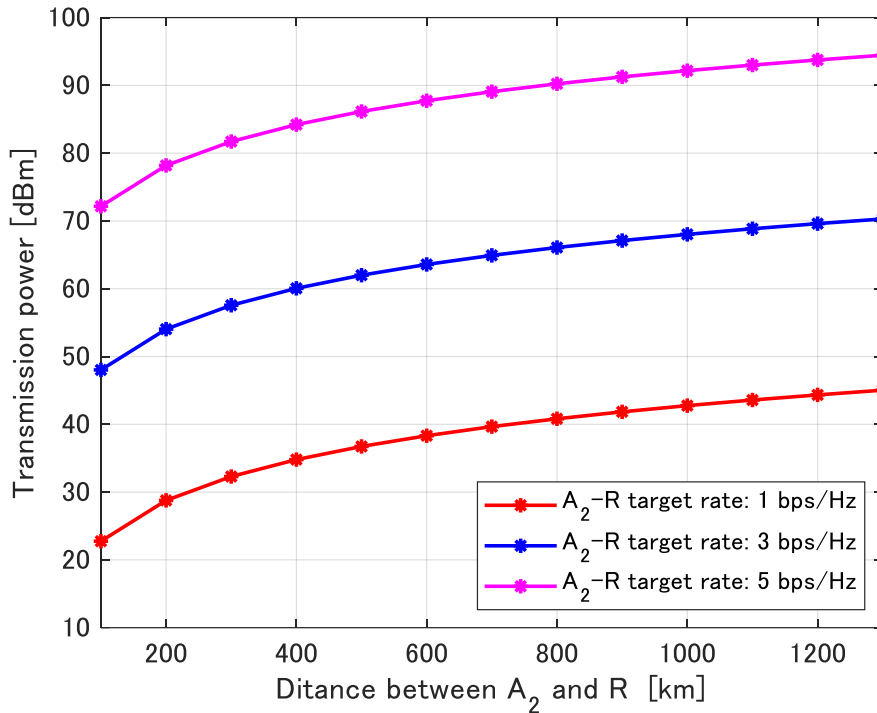


図 4.11 提案電力制御方式において中継衛星- A_2 間の衛星間距離を変化させた時の A_2 の送信電力の計算結果

最後に対象とする衛星群が実際に地球を周回する環境を想定し、提案した電力制御方式を適用した時の各リンクの送信電力を計算した結果を図 4.12 に示す。各リンクの目標通信レートは 5 bps/Hz に設定した。 A_2 から中継衛星に向けた通信及び中継衛星から B_1 , B_2 にむけた通信の送信電力は図 4.5 に示した衛星間距離の変動に伴い変化していることが分かる。時刻 1000, 4200 s 付近では中継衛星- A_2 , B_2 間の距離が最小となるため、 A_2 から中継衛星に向けた通信及び中継衛星から B_2 に向けた通信に必要な送信電力は最小となる。また 2 番目のタイムスロットにおいて Strong user である B_1 に割り当てられる送信電力が最小となることで、Weak user である B_2 に割り当てられる送信電力も弱くする必要がある。一方 1 番目のタイムスロットにおいては Strong user である A_2 の送信電力は衛星間距離に応じて変化するが、特定の通信レートを達成するように送信電力が制御されるため、受信電力は変わらない。したがって Weak user である A_1 の受信電力も固定値である必要がある。 A_1 -中継衛星間の距離は一定であるため、 A_1 の送信電力は一定となる。また各リンクの通信レート、BER は提案した電力制御方式により一定となった。

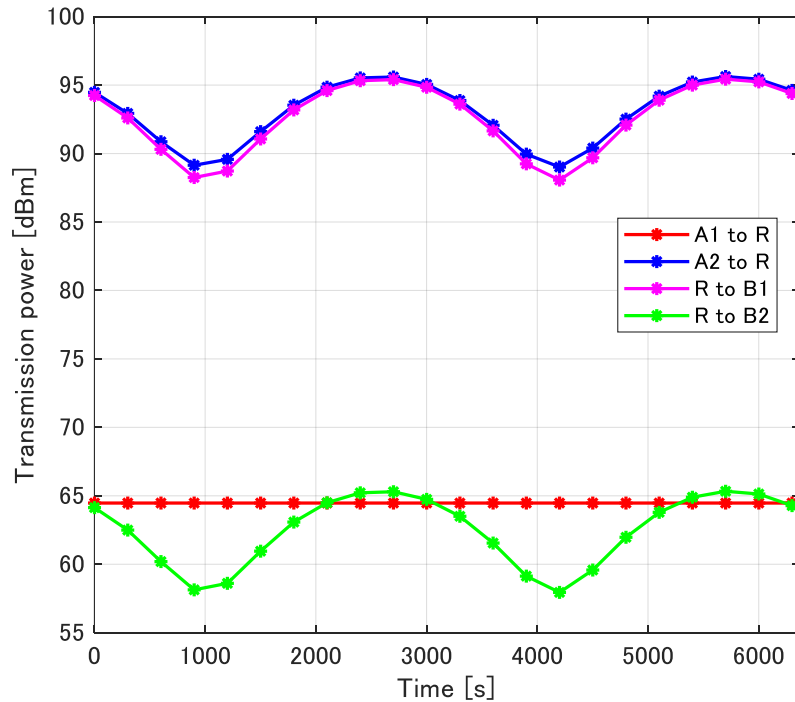


図 4.12 衛星 1 周期中における提案電力制御方式による各リンクの送信電力の計算結果

4.5 小結論

本章では低軌道衛星コンステレーション中の衛星間通信において NOMA を適用することで高速な通信を実現する方式を提案した。本方式では衛星をグループ A, グループ B, 中継衛星に分割し, 中継衛星を介して 2 つのグループ間の通信を行う。1 番目のタイムスロットではグループ A の衛星群から中継衛星への通信をアップリンク NOMA により同一周波数・時間上で行う。2 番目のタイムスロットでは中継衛星からグループ B の衛星群への通信をダウンリンク NOMA により 1 つのビーム上で行う。衛星間通信は大気減衰等の影響を受けないが, 極軌道の場合は衛星が地球を周回する間に衛星間の距離が変動する。そのため固定電力割当方式では通信性能が変動してしまう。そのため衛星間の距離が軌道情報により事前に計算可能なことを利用し, 達成したい目標通信レートから送信電力を決定する電力制御方式を提案した。シミュレーション結果より, NOMA を適用することで周波数利用効率が向上し, TDMA よりも通信レートが大きくなることが分かった。また衛星の 1 周期中における BER と通信レートを測定すると, 固定電力割当方式では衛星間の距離の変化に伴い通信性能も変化することが確かめることができた。さらに通信経路によって通信性能に差が生じることも分かった。提案した電力制御に関するシミュレーションの結果より, 提案方式では衛星間距離の変化による影響を吸収し, 各リンクの通信レートを一定に制御できることが分かった。

本研究は低軌道衛星コンステレーションにおける一部分の通信に着目した研究である。

実際の低軌道衛星通信では衛星から衛星へのマルチホップ通信を行い、何本もの衛星間リンクを経由して地上の送信機から受信機までの通信を中継する。そのため今回の研究は4本のリンクの中で NOMA を適用する方式について検討したが、より広範な低軌道衛星ネットワークにおいて提案方式をどのように組み込んでいくか、という部分について今後検討していく必要がある。また本研究で提案した方式とは少し異なるが、低軌道衛星及び中軌道衛星を組み込んだネットワークにおいて NOMA 及び独自のルーティング方式を適用する手法について次章において述べる。

また提案した電力制御方式において、今回は全てのリンクにおいて同一の目標通信レートを設定した。しかし各リンクに必要な QoS や、衛星が位置する地域周辺のトラフィック要求の多さに応じて目標通信レートを変動させる方式についても検討する必要があると考える。例えばトラフィック要求が多く、使われる頻度の多いリンクの目標通信レートを大きくすると、輻輳の発生率及びユーザの遅延時間を低減することができる。しかし目標通信レートが低い場合、受信電力の低下に伴い BER も低下するため、QoS 制御と通信精度のトレードオフについても考慮する必要がある。

5. 周回衛星を用いたコンステレーションにおける NOMA の適用に関する研究

5.1 概要・研究背景

本章では低軌道衛星・中軌道衛星を組み合わせたコンステレーションにおいて、NOMA 及び独自のルーティング方式を適用することで、遅延時間を低減する手法について提案する。なお本章に記載する内容は卒業論文及び IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) 2022 において発表した内容と重複する部分がある [20][66]。4.1 において述べたように、低軌道衛星通信における弱点の 1 つとして遅延時間が挙げられる。衛星通信の可用性を高めるためには、遅延時間を始めとした通信性能を高め、対応できるサービスの幅を広める必要がある。そこで本章では低軌道衛星に加えて中軌道衛星も搭載したコンステレーションにおいて NOMA を適用することでより高速な通信を実現する手法を提案する。1.1 において述べたように、地上-衛星間の通信リンクにおける NOMA の適用については多くの先行研究がある [10][11]。一方で衛星間のリンクにおける NOMA の適用については先行研究が非常に少ない。また 4 章において述べたように、私達は電波を用いた衛星間通信における NOMA の適用について研究を行った [60]。しかし衛星間光通信における NOMA の適用に関する先行研究は少ない。また 4 章に述べた研究は低軌道コンステレーションの一部分である数本のリンクにおける NOMA の適用に着目した研究であるが、低軌道コンステレーションにおける end-to-end の通信に NOMA を組み込む手法については検討されていない。そこで本研究では衛星間光通信システムを題材とし、end-to-end の通信において NOMA 及び独自のルーティング方式を組み込むことで遅延時間の抑制を実現する手法を提案する。

提案システムには 3 つの特徴がある。第 1 に、送信局-受信局間の距離に応じて低軌道衛星と中軌道衛星を使い分けるルーティング方式を実装する。具体的には、送信局-受信局間の距離が短い時は従来の方式と同じように低軌道衛星のみを利用した経路を選択する。一方送信局-受信局間の距離が長い時は中軌道衛星を介した経路を選択する。パケットが 2 層に分散されることで、衛星 1 基が単位時間あたりに処理するパケット数が低減するため、各衛星におけるパケットの待ち時間が短くなり、遅延時間が抑制される。第 2 に、複数の低軌道衛星から 1 基の中軌道衛星に向けた通信にアップリンク NOMA を適用することで高速な通信を実現する。詳細は後述するが、ルーティングによって中軌道衛星を用いた経路が選択される場合、低軌道衛星を介して中軌道衛星にパケットが送られ、その後中軌道衛星間のリンクを介して受信局に近い衛星までパケットが運ばれる。低軌道衛星に比べて中軌道衛星の数が少ないため、1 基の中軌道衛星に向けて送信されるパケット数が多くなる。そこで低軌道衛星から中軌道衛星に向けた通信に NOMA を適用することで同一周波数・時間上で複数の信号の送信を可能にする。第 3 に、光通信を活用する。2.1.5 において述べた通り、光通信は雲や大気による減衰による影響を強く受けるため、地上-衛星間通信においては活用が難しい。一方衛星間には大気や雲が存在しないため、光チャネルを安定的に利

用することができる。したがって本研究では光通信を採用し、より高速な通信を実現する手法について探求する。

本研究では周回衛星コンステレーションにおける NOMA と独自のルーティング方式を活用した通信システムについて、詳細な通信手順や NOMA の制御方式を提案する。さらにシミュレーションにより、提案したコンステレーション及びルーティング方式を用いた場合と従来のコンステレーション及びルーティング方式を用いた場合の通信ホップ数、遅延分布、平均遅延時間を比較する。また 4.3.5 において述べた電力制御方式を本システムにも採用する。提案した電力制御方式を適用した NOMA、固定電力割当方式を適用した NOMA、OMA の BER 及びスループットに関する比較も行う。

チャンネルモデルについては 4.2 に記載した衛星間通信のチャンネルモデルと同じものを使用するため、本章では記載を省略する。

5.2 システムモデル

5.2.1 コンステレーション

5.1 において述べたように、本システムでは低軌道衛星と中軌道衛星を組み合わせたコンステレーションを利用する。提案方式において採用するコンステレーションを図 5.1 に示す。青線が低軌道衛星の軌道、赤線が中軌道衛星の軌道を示す。低軌道衛星は軌道数 16 本、軌道内衛星数 32 基、軌道傾斜 90 度の極軌道のコンステレーションを使用する。中軌

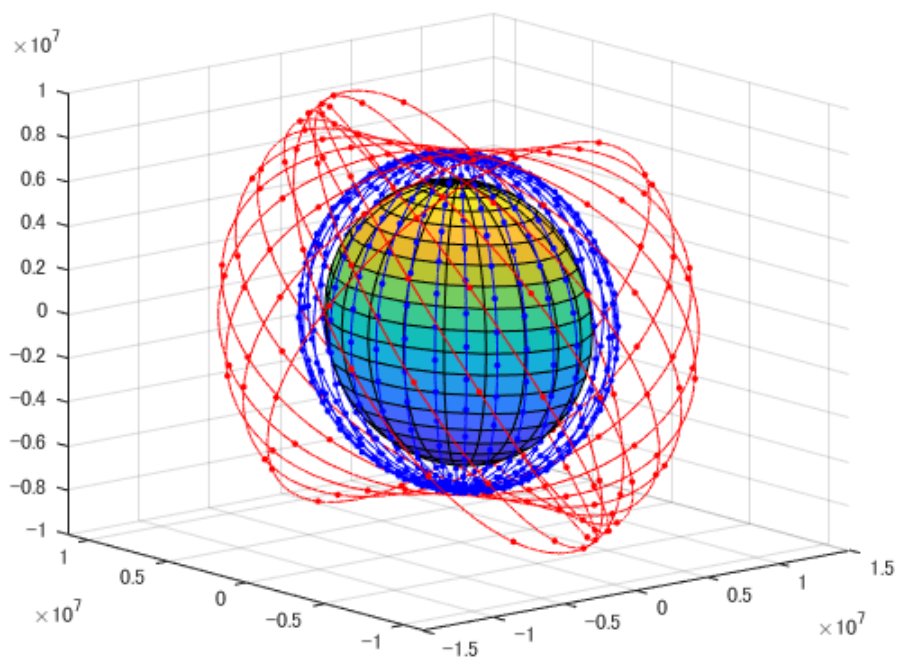


図 5.1 提案方式の衛星コンステレーション

道衛星は軌道数 12 本，軌道内衛星数 12 基，軌道傾斜 55 度の傾斜軌道を使用する．2.1.3 において述べたように，極軌道と傾斜軌道はそれぞれ異なる特性を持っている．極軌道は北極・南極を含め地球全体をカバーできるが，高緯度地域に比べて人口密度の高い低・中緯度地域において衛星の密度が疎となるため，効率性の観点から問題がある．一方傾斜軌道は北極・南極付近に衛星が位置していないため高緯度地域において通信を提供することができないが，低・中緯度地域において衛星が均等に配置されており，通信の効率性が高い．提案方式では極軌道の低軌道衛星と傾斜軌道の中軌道衛星を組み合わせることで，高緯度地域をカバーしつつ低・中緯度地域において高い効率性を達成することができる．

次に各衛星が所有する衛星間通信リンクについて説明する．各低軌道衛星は隣接する 4 基の低軌道衛星（同一軌道上 2 基，隣接軌道上 2 基）に加え，自身から最も近い距離に位置する中軌道衛星への送信リンクを持つ．中軌道衛星も同様に隣接する 4 基の中軌道衛星に加え，自身から最も近い位置に位置する低軌道衛星に向けた送信リンクを持つ．即ち各衛星は同一高度内で行う層内通信用の送信リンク 4 本と，異なる高度に向けた層間通信用の送信リンク 1 本を持つ．なお各衛星においてリンク保持数には限界があることから，各衛星は 5 本のみ衛星間リンクを保持できるものとする[28]．これらのリンクを使い分けることで，パケットを 2 層に分散し，地上の送信局と受信局間の通信を中継する．先述した軌道情報からも分かる通り，低軌道衛星に比べ中軌道衛星の方が数は少ないため，1 基の中軌道衛星に向けた送信リンクが多くなる．したがって低軌道衛星から中軌道衛星に向けた通信に NOMA を適用することで周波数利用効率を改善する．

5.2.2 通信手順

提案方式における通信手順について説明する．5.1 において述べた通り，提案方式では低軌道衛星と中軌道衛星にパケットを分散することで各衛星におけるキュー遅延を少なくし，end-to-end の遅延時間を抑制する．具体的には，地上の送受信局間の伝搬距離が短い場合は低軌道衛星間のリンクのみを使用し，送受信局間の伝搬距離が長い場合は低軌道衛星に加え中軌道衛星も活用する．

まず送受信局間の伝搬距離が短い場合の通信手順を図 5.2 に示す．図 5.2 に示した通り，低軌道衛星間のリンクのみを使用して地上局間の通信を中継する．第 1 に，地上の送信局から最寄りの低軌道衛星に向けて信号を送信する．なお周回衛星は周期的に動いているため，時刻から各衛星の位置は算出可能である．第 2 に，低軌道衛星間のリンクを介し，地上の受信局から最寄りの低軌道衛星まで信号を送信する．最後に，信号を受信した低軌道衛星が地上の受信局にデータを送信し，通信を完了させる．この方式は従来の低軌道衛星通信と同様のルーティング手法である．

次に送受信局間の伝搬距離が長い場合の通信手順を図 5.3 に示す．低軌道衛星間，低軌道衛星-中軌道衛星間，中軌道衛星間の 3 種類のリンクを組み合わせ，送受信局間の通信を中継する．第 1 に，送受信局間の伝搬距離が短い場合と同様に，地上の送信局から最短

- 通信手順
- ①地上局Txから最寄りの低軌道衛星へ通信
 - ②低軌道衛星間のリンクを使用してRxから最も近い低軌道衛星に送信.
 - ③低軌道衛星から地上局Rxにむけて送信.

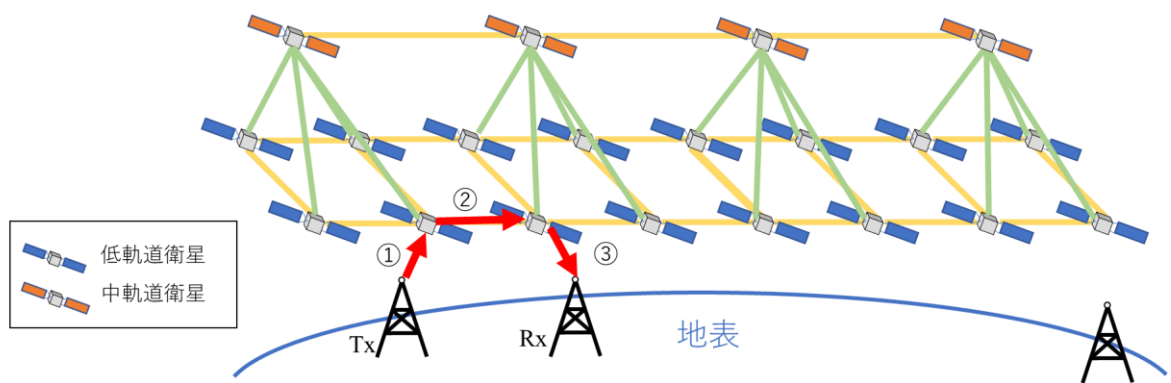


図 5.2 提案方式における伝播距離が短い場合の通信手順

- 通信手順
- ①地上局Txから最寄りの低軌道衛星へ送信
 - ②低軌道衛星から最寄りの中軌道衛星に向けて送信 (アップリンクNOMA)
 - ③中軌道衛星間のリンクを使用してRxから最も近い中軌道衛星まで送信.
 - ④中軌道衛星から最も近い低軌道衛星へ送信
 - ⑤低軌道衛星間のリンクを利用してRxから最も近い低軌道衛星まで送信.
 - ⑥低軌道衛星から地上局Rxへ送信

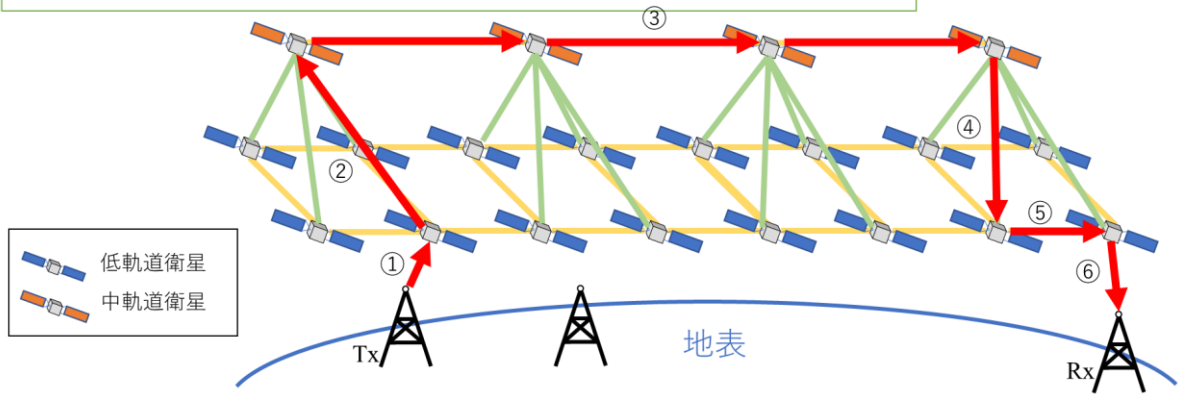


図 5.3 提案方式における伝播距離が長い場合の通信手順

の距離に位置する低軌道衛星に向けて信号を送信する。第 2 に、信号を受信した低軌道衛星から最寄りの中軌道衛星へ信号を送信する。第 3 に、中軌道衛星間のリンクを介し、地上の受信局に最も近い中軌道衛星まで信号を転送する。第 4 に、中軌道衛星から最寄りの低軌道衛星へ信号を送信する。第 5 に、低軌道衛星間のリンクを介し、地上の受信局から最寄りの低軌道衛星まで信号を送信する。最後に、低軌道衛星から地上の受信局へ信号を送信する。図 5.3 の②における低軌道衛星から中軌道衛星に向けた通信に NOMA を適用する。NOMA の割当方式及び電力制御方式の詳細は 5.2.3 に述べる。

以上述べたように、提案方式では送受信局間の伝搬距離に応じてパケットを 2 層に分散

させることで、遅延時間を抑制する。従来方式の場合は低軌道衛星間のリンクのみを使用したルートが採用されるため、図 5.4 に示す通り 6 本の低軌道衛星間のリンクが使用される。一方図 5.3 に示した提案方式の場合は低軌道衛星間のリンクを 1 本しか使用していない。よって衛星間リンク 1 本あたりのパケット数が提案方式は従来方式よりも少なくなるため、各衛星におけるキューの待ち時間が少なくなり、遅延時間が抑制される。なお図 5.3 の④において、本研究では指向可能な衛星数の制約から、各中軌道衛星は同一高度の衛星 4 基に加え、自身から最短距離に位置する低軌道衛星 1 基のみに送信リンクを持つ環境を想定している。そのため⑤において低軌道衛星間のリンクを介して受信局から最寄りの低軌道衛星まで信号を転送する必要があるが、従来方式と比べると低軌道衛星間のリンクを使用する回数は大幅に少なくなる。また本研究では地上局と中軌道衛星は直接通信を行わないものとし、必ず低軌道衛星を介して信号を転送している。これは中軌道衛星に比べ低軌道衛星は高度が低いため、地上局の送信電力を抑えることができるためである。

経路決定はダイクストラ法という最小ホップ数の経路を選択するアルゴリズムによって行う。図 5.2 と図 5.3 のどちらの方式を使うかについてもダイクストラ法によって決定する。即ち低軌道衛星間のリンクのみを使用した方が通信ホップ数は少ない場合は図 5.2 の方式、中軌道衛星を介した方がホップ数は少ない場合は図 5.3 の方式を選択する。なお低軌道衛星間のリンクに比べ中軌道衛星間のリンクの方がリンク距離は長い。また中軌道衛星を介する場合は低軌道衛星-中軌道衛星間の通信リンクを 2 回通る必要があるため、図 5.4 のように低軌道衛星間のリンクのみを使用した場合よりも図 5.3 のように中軌道衛星を介した時の方が伝搬距離及び伝播遅延は長くなる。そのためネットワーク中のパケット数が少なくキュー遅延がほとんどない場合は従来方式の方が伝搬距離は短いため遅延時間は抑制される。一方パケット数が多くキュー遅延が大きい場合、パケットを分散しキュー遅延を小さくすることのできる提案方式の方が遅延時間は抑制されると考える。

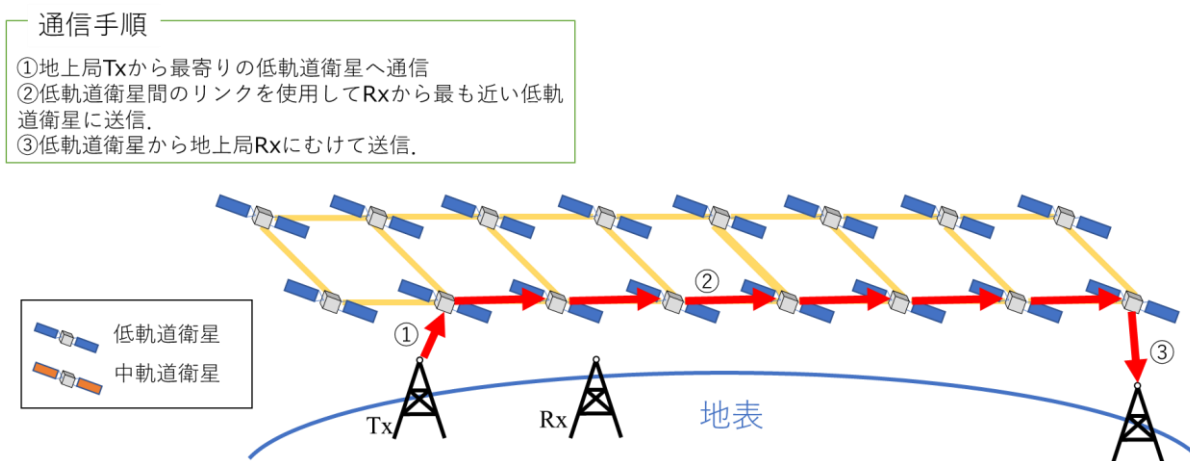


図 5.4 従来方式における通信手順

5.2.3 NOMA におけるスケジューリング・電力制御方式

5.1, 5.2.1 において述べたように, 本研究で採用するコンステレーションでは低軌道衛星に比べて中軌道衛星の衛星数は少なくなるため, 複数の低軌道衛星から 1 基の中軌道衛星に向けて同時に通信が行われる. そこで低軌道衛星から中軌道衛星に向けた通信に NOMA を適用することで, 周波数利用効率を改善する. さらに NOMA における通信性能を改善するために, 独自のスケジューリング方式と 4.3.5 に述べた電力制御方式を実装する. NOMA における制御手順を以下に示す. また本方式において想定する低軌道衛星-中軌道衛星間の通信環境を図 5.5 に示す.

1. 軌道情報と時刻より, 各低軌道衛星と各中軌道衛星の間の距離を計算する. 計算結果を基に, 各低軌道衛星がどの中軌道衛星に向けた送信リンクを持つかを決定する.
2. サブバンドへのスケジューリングを行う. 同じ中軌道衛星に向けた通信リンクを持つ低軌道衛星群を 1 つのグループとし, グループ毎にサブバンドに割り当てる. サブバンドへの割り当ては各低軌道衛星と中軌道衛星の衛星間距離に基づいて行う.
3. サブバンド毎に各低軌道衛星の送信電力を決定する. 各ユーザのチャンネル係数と目標の通信レートを基に, 4.3.5 に述べた電力制御方式によって各低軌道衛星の送信電力を決定する.

それぞれの詳細について論じる. 第 1 に, 各低軌道衛星と各中軌道衛星の間の距離を計算する. 5.2.1 において述べたように, 各低軌道衛星は自身から最も近くに位置する中軌道衛星に向けた送信リンクを持つ. そのため同じ中軌道衛星へ送信リンクを持つ低軌道衛星群を抽出し, その中で NOMA におけるサブバンドの割り当て及び送信電力を決定する.

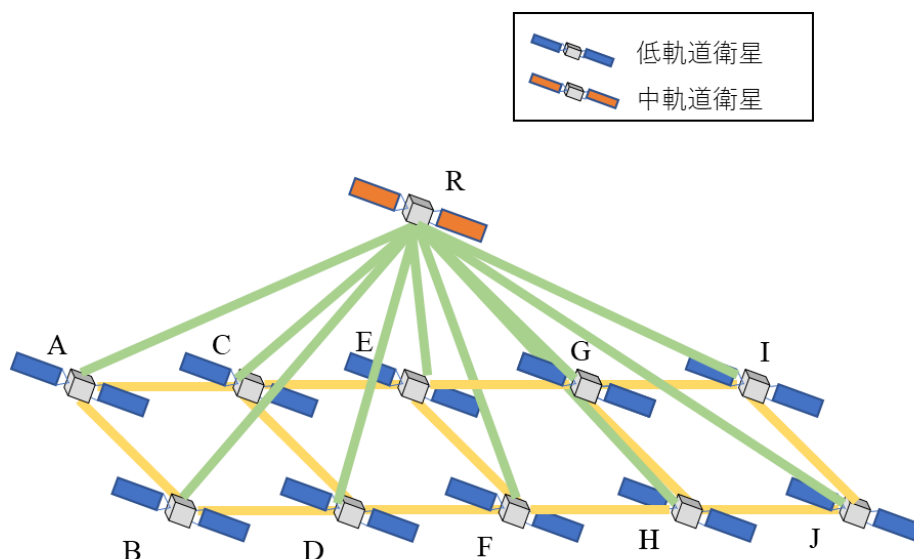


図 5.5 低軌道衛星-中軌道衛星間の通信モデル

第2に、同じ中軌道衛星への送信リンクを持つ低軌道衛星のグループ毎にサブバンドへのスケジューリングを行う。3.3.3において述べたように、NOMAではチャンネル状態の良いユーザを高い電力レベルに、チャンネル状態の悪いユーザを低い電力レベルに割り当てる方式が最も電力効率が高く、広範に用いられている[41]。よって本研究でもこの方式を採用する。衛星間チャンネルはフェージング等の影響を受けないため、チャンネル状態及びチャンネル係数は衛星間距離によって決定づけられる。即ち衛星間距離の長いユーザはチャンネル係数が小さく、短いユーザはチャンネル係数が大きい。したがって中軌道衛星との間の距離が長い低軌道衛星が低い電力レベルに、短い低軌道衛星が高い電力レベルに割り当てられるといったように、衛星間距離に基づき順番に割り当てていく。図5.5の環境下においてスケジューリングを行う例を図5.6に示す。中軌道衛星との間の伝搬距離はA, B, C, D, E, F, G, Hの順であり、NOMAにおいて多重化するユーザ数が2, 3の場合、それぞれ図5.6の様子に割り当てられる。衛星間距離が長い順にスケジューリングされるため、各サブバンドにおいてユーザ間で衛星間距離に必ず差が生じる。したがって電力差をつけやすく、NOMAにおける効率性、通信精度、スループットの向上が実現できる。

NOMAによる復号手順は2.2.2と同様である。NOMAにより多重化するユーザ数が多いほど、サブバンド1つあたりの帯域幅が大きくなるため、スループットは向上する。一方多重化するユーザ数が多いほどSICの複雑度は増し、特に電力レベルが低いユーザの通信精度は低下することが予想される。したがってスループットと通信精度のトレードオフを考慮した上で多重化するユーザ数を決定する必要がある。

第3に、サブバンド毎に各低軌道衛星の送信電力を決定する。電力制御のアルゴリズムは4.3.5において述べた手法と同一のものを使用する。あるサブバンドにおけるm番目のユーザのSINRは次式より表される。なお最も電力レベルが大きいユーザを1番目のユーザとし、番号が大きくなるごとに電力レベルは小さくなるものとする。

$$\gamma_m = \frac{|h_m(t)|^2 P_m}{\sum_{k=m+1}^n |h_k(t)|^2 P_k + \sigma^2} \quad (5.1)$$

中軌道衛星との間の距離 : A>B>C>D>E>F>G>H

NOMAのユーザ数=2

受信電力	Weak	Strong
sub-band 1	A	E
sub-band 2	B	F
sub-band 3	C	G
sub-band 4	D	H

NOMAのユーザ数=3

受信電力	Weak	↔	Strong
sub-band 1	A	D	G
sub-band 2	B	E	H
sub-band 3	C	F	

図5.6 NOMAにおけるスケジューリングの例

P_i は*i*番目のユーザの送信電力、 σ^2 は雑音電力である。 h_i は*i*番目のユーザのチャンネル係数とし、式(4.4)と(4.10)から以下のように計算される。

$$h_m = g(t)e^{j2\pi f_d(t)t} \quad (5.2)$$

$g(t)$ は式(4.4)より算出されるチャンネル係数、 f_d はドップラーシフトを指す。4.3.5に述べたアルゴリズムより、*m*番目の低軌道衛星の送信電力は次式より決定される。

$$P_m = \frac{\sum_{k=m+1}^n |g_k(t)|^2 P_k + \sigma^2}{|g_m(t)|^2} SINR_m \quad (5.3)$$

$SINR_m$ は目標とする SINR の値である。本研究では各サブバンドにおいていずれかのユーザの送信電力が最大送信電力に達するまで、目標 SINR の値を徐々に増加させていく。そしていずれかのユーザの送信電力が最大送信電力に達した時点の各ユーザの送信電力の値を採用する。即ち最大送信電力の値が大きいほど SINR の値は大きくなり、各ユーザの送信電力の値も大きくなる。衛星間距離は軌道情報から計算可能であり、衛星間のチャンネルはフェージング等の影響を受けないため、式(5.3)より目標の SINR を達成するために必要な各低軌道衛星の送信電力は算出可能である。また電力レベルの低いユーザの受信電力が高いユーザの信号に対して干渉信号として作用するため、電力レベルの低いユーザの送信電力から順に計算する必要がある。本方式により、各ユーザの通信精度を確保とスループットの向上を実現できる。

5.3 結果・考察

5.3.1 シミュレーション条件

本研究では2つのシミュレーションを行う。1つ目は図5.5に示した低軌道衛星-中軌道衛星間の通信における NOMA の性能を検証するシミュレーションである。複数の低軌道衛星から中軌道衛星に向けた通信に着目し、提案した電力方式を適用した NOMA、固定電力割当方式を適用した NOMA、OMA の性能を比較する。2つ目のシミュレーションでは地上の送信局から受信局までの end-to-end の通信に着目し、各パケットの遅延時間を測定する。5.2.1、5.2.2において述べたコンステレーション及びルーティング手順を実装する。地球上のランダムな地点通信セッションを発生し、それぞれ通信を行う。各パケットの遅延時間を測定し、低軌道衛星に加えて中軌道衛星を用いた提案方式と低軌道衛星のみを用いた従来方式の通信ホップ数、遅延時間の分布、平均遅延時間を比較する。シミュレーションパラメータを表5.1に示す。各衛星において 0.01 ms の処理遅延が発生するものとしている。

表 5.1 シミュレーションパラメタ (周回衛星における NOMA の適用に関する研究)

項目	値
軌道数 (LEO)	16 本
軌道内衛星数 (LEO)	32 基
軌道高度 (LEO)	1,200 km
軌道傾斜 (LEO)	90 度 (極軌道)
軌道数 (MEO)	12 本
軌道内衛星数 (MEO)	12 基
軌道高度 (MEO)	5000 km
軌道傾斜 (MEO)	55 度
波長	819 nm
帯域幅	1 THz
変調方式	BPSK+NOA
送受信機の利得	120 dB
ポインティングロス	0 dB
各衛星における処理遅延	0.01 ms
セッション数 (5.3.3)	100~2000
パケット長 (5.3.3)	100 kbit
最大送信電力 (5.3.3)	120 dB

5.3.2 LEO-MEO 間通信における NOMA の通信性能

本シミュレーションでは 5.2.3 に置いて論じた NOMA の通信性能を検証する。図 5.5 に示したように、10 基の低軌道衛星から 1 基の中軌道衛星に向けて通信する環境を想定し、提案した電力方式を適用した NOMA、固定電力割当方式を適用した NOMA、OMA の通信性能を比較する。固定電力割当方式を適用した NOMA では、スケジューリング方式は 5.2.3 で述べた方式を適用し、電力制御方式のみ提案方式ではなく固定電力割当方式を適用する。電力割当率は多重化するユーザ数が 2 基の場合はそれぞれ 0.7, 0.3, 3 基の場合はそれぞれ 0.7, 0.2, 0.1 とする。OMA では各低軌道衛星が最大送信電力で信号を送信する。第 1 に、最大送信電力を 0~50dBm の間で変化させた時の BER を測定した結果を図 5.7 に示す。まず提案方式の BER を見ると、最大送信電力の増加に伴い BER が低下していることが分かる。これは 5.2.3 において述べたように、最大送信電力が大きくなることで達成できる SINR の値が大きくなり、全ユーザの送信電力が増加するためであると考えられる。NOMA を適用した 2 方式と OMA を適用した方式を比較すると、NOMA を適用した方式の方が BER は高くなっていることが分かる。NOMA では Strong user の信号を復号する際に Weak user の信号が干渉信号として働くため、OMA よりも復号に失敗する確率は高くなる。また Weak user の受信電力は低めに設定する必要がある

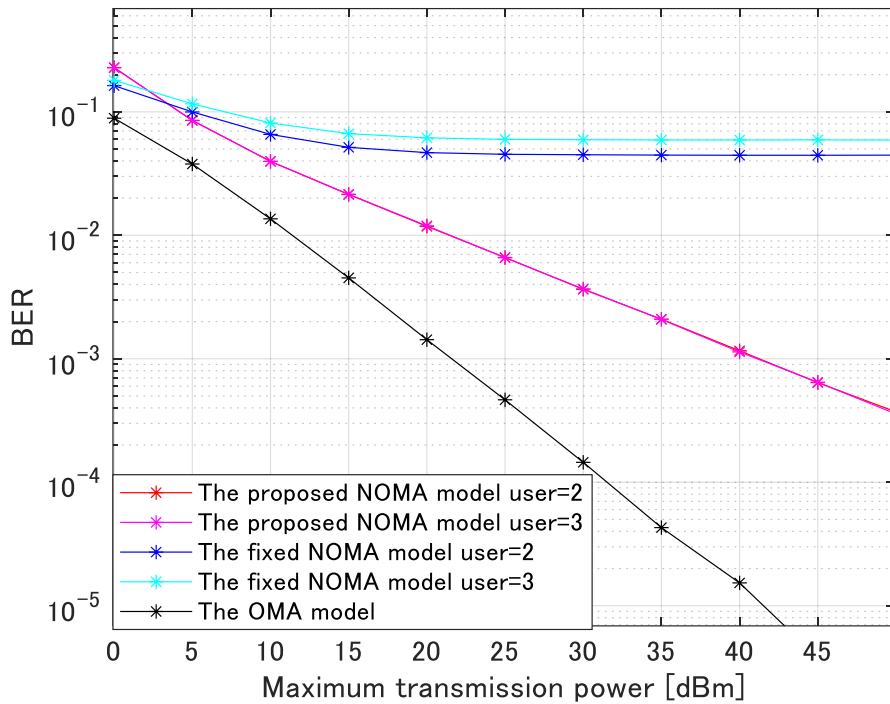


図 5.7 LEO-MEO 間通信における BER の測定結果

るため、OMA において最大送信電力を設定した場合と比べて受信電力が小さくなり、BER は悪化する。次に提案した電力制御方式を適用した NOMA と固定電力割当方式を適用した NOMA を比較すると、提案方式の方が BER は低いことが分かる。このことから提案した電力制御方式は通信精度の向上を実現できていることがわかる。また NOMA における多重化ユーザ数を変えたときの結果を比較すると、固定電力割当方式では多重化ユーザ数を多くした時の方が BER は高い値になっていることが分かる。多重化するユーザ数を多くすることで、電力レベルの高いユーザは干渉電力が大きくなるため BER は悪化する。電力レベルの低いユーザも受信電力をより低く設定する必要があるため、BER は悪化する。反対に提案方式では電力制御方式により各ユーザの SINR が均一になるように制御されるため、NOMA のユーザ数を増やした場合であっても BER は同じ値となる。

第 2 に、通信レートの測定を行った結果を図 5.8 に示す。シミュレーションの条件は BER に関するシミュレーションと同一である。提案した電力制御方式を適用した NOMA の通信レートは固定電力割当方式を適用した NOMA 及び OMA の通信レートよりも大きいことが分かる。このことから提案方式では周波数利用効率の改善を実現することで、より高速な通信を達成できているといえる。また NOMA において多重化するユーザ数が 2 基の場合と 3 基の場合を比較すると、多重化するユーザ数を増やした時の方が通信レートは大きいことが分かる。これは 5.2.3 において述べたように、多重化するユーザ数を多くすることでサブバンドの数が少なくなり、サブバンド 1 つあたりの帯域幅が大き

くなることによるものであると考えられる。

上記2つのシミュレーションの結果より、提案方式ではNOMAを適用することで通信レートの向上を実現できることが分かった。しかしSICによる信号分離の際に誤差が生じる確率があることから、BERはOMAに比べて悪化する。また提案した電力制御方式と固定電力割当方式を比較すると、提案方式は通信レートと通信精度双方の向上を実現できることが分かった。最後にNOMAにおいて多重化するユーザ数を増やすと、提案方式ではサブバンドあたりの帯域幅が大きくなることでスループットが増加することが分かった。BERについては多重化ユーザ数が2, 3基の場合では差がつかなかったが、多重化ユーザ数をさらに増やすと差が生じるものと考えられる。

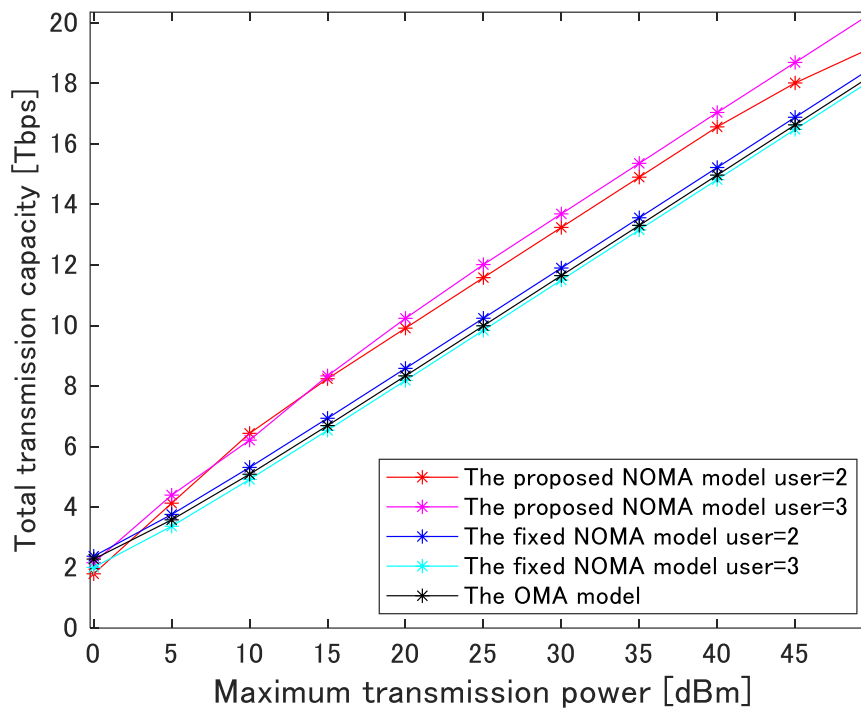


図 5.8 LEO-MEO 間通信における通信レートの測定結果

5.3.3 提案方式における end-to-end の通信性能

2 番目のシミュレーションでは図 5.1 に示した低軌道衛星・中軌道衛星を搭載した提案方式のコンステレーションと低軌道衛星のみを搭載した従来方式のコンステレーションについて、end-to-end の通信性能を比較する。具体的には、送信地点・受信地点を地球上のランダムな位置に設定した 100~2000 本の通信セッションを生成し、それぞれ 5.2.2 において述べたルーティング手順に従い経路を決定する。その経路に従い全てのセッションで同時に通信を開始し、セッション毎に受信局に到達するまでの通信ホップ数及び遅延時間を測定する。表 5.1 に記したように、各セッションにおいて地上の送信局は 0.01 ms 毎に 100 kbit のパケットを送出する。経路は送信地上局側で算出し、各衛星は送信局から支持された経路通りにパケットを転送する。各衛星は受け取ったパケットを自身のキューに保存し、FIFO(First In First Out)により逐次処理していく。また各衛星がパケットを創出する際に 0.01 ms のホップ遅延が生じるものとする。

まず提案方式と従来方式におけるルーティングの結果であるホップ数の分布を図 5.9, 5.10 に示す。提案方式、従来方式における平均ホップ数はそれぞれ 6.8, 12.8 となった。このことから提案方式ではホップ数が抑制されていることがわかる。5.2.2 において述べた通り、提案方式では送受信局間の距離が長い場合は低軌道衛星に加えて中軌道衛星のリンクも活用される。中軌道衛星間のリンクは低軌道衛星間のリンクよりも長いため、中軌道衛星間のリンクを活用することでホップ数を抑制することができる。

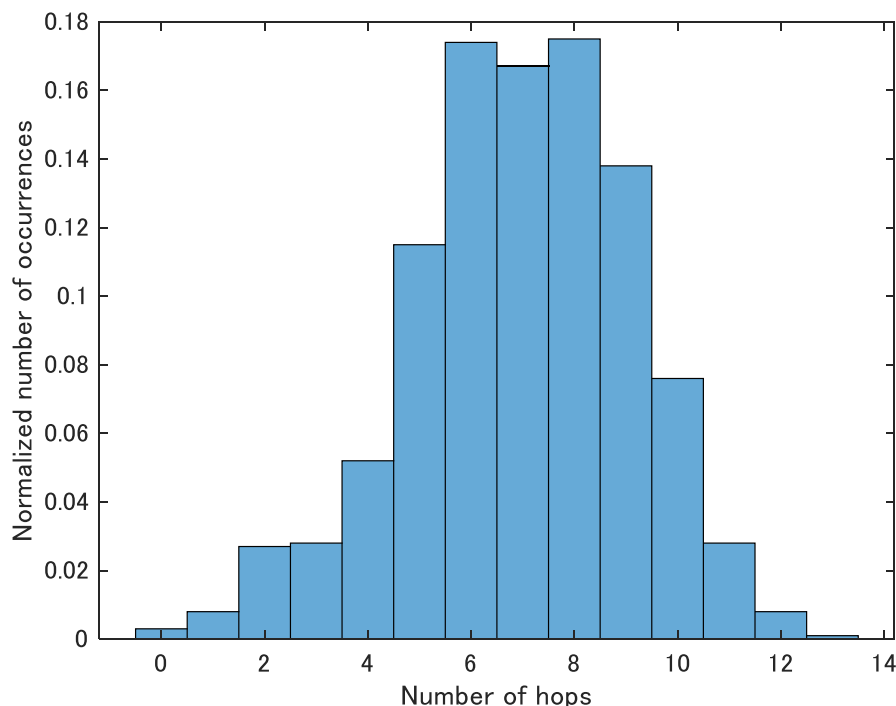


図 5.9 提案方式におけるホップ数の分布

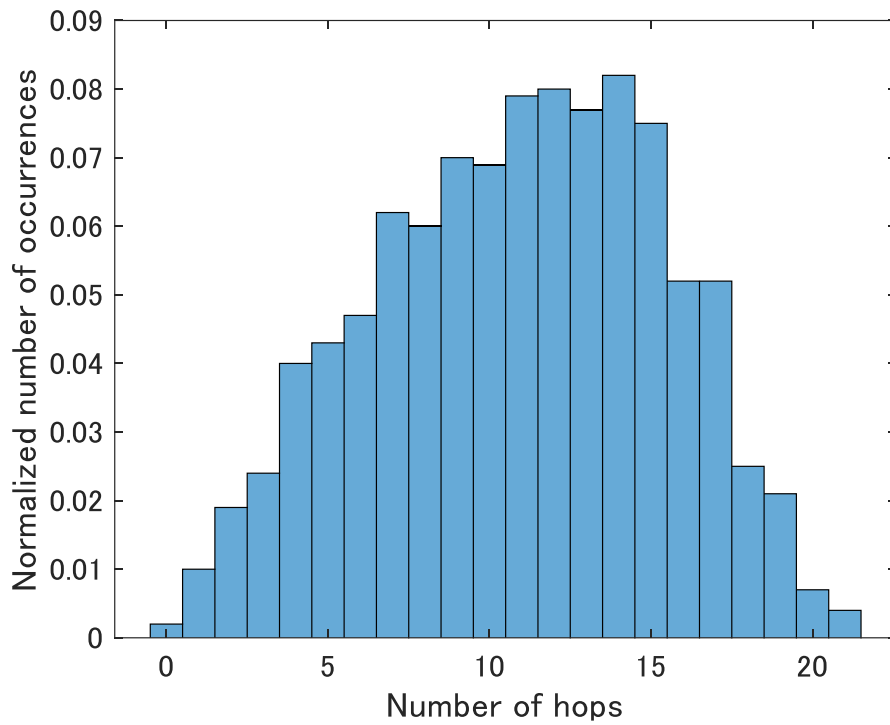


図 5.10 従来方式におけるホップ数の分布

次にセッション数を 1000 とし、提案方式及び従来方式においてホップ数-平均遅延時間の散布図を作成した結果を図 5.11, 5.12 に示す。両モデルにおいてホップ数の増加に伴い遅延時間も増大していることが分かる。さらに提案方式と従来方式の遅延時間を比較すると、提案方式の方が遅延時間は短い。このことから、提案方式では中軌道衛星を活用したパケットの 2 層への分散により、遅延時間の抑制を実現出来ていることがわかる。

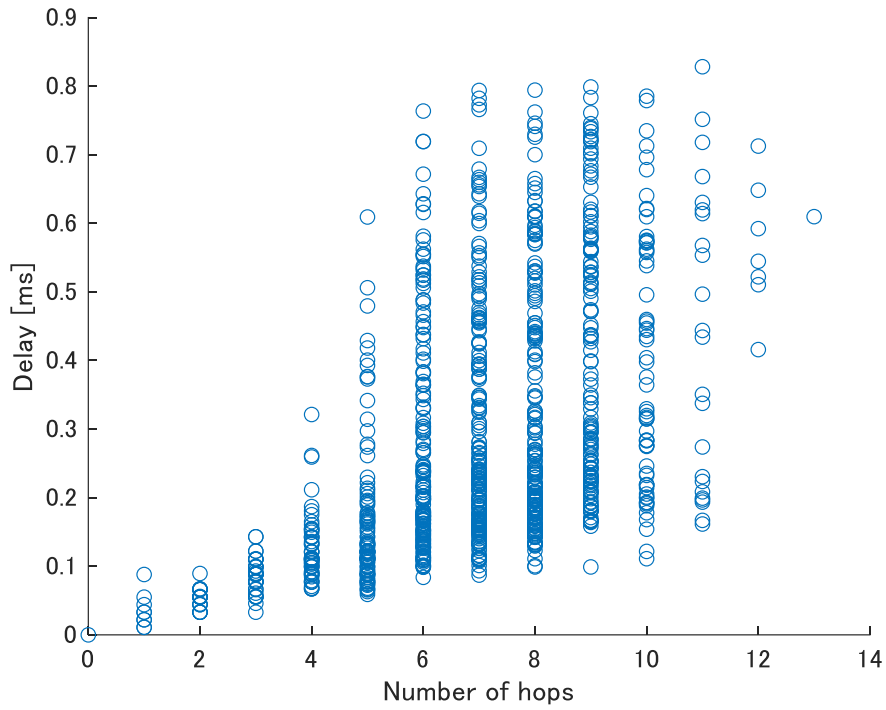


図 5.11 提案方式におけるホップ数-遅延時間の散布図（セッション数：1000）

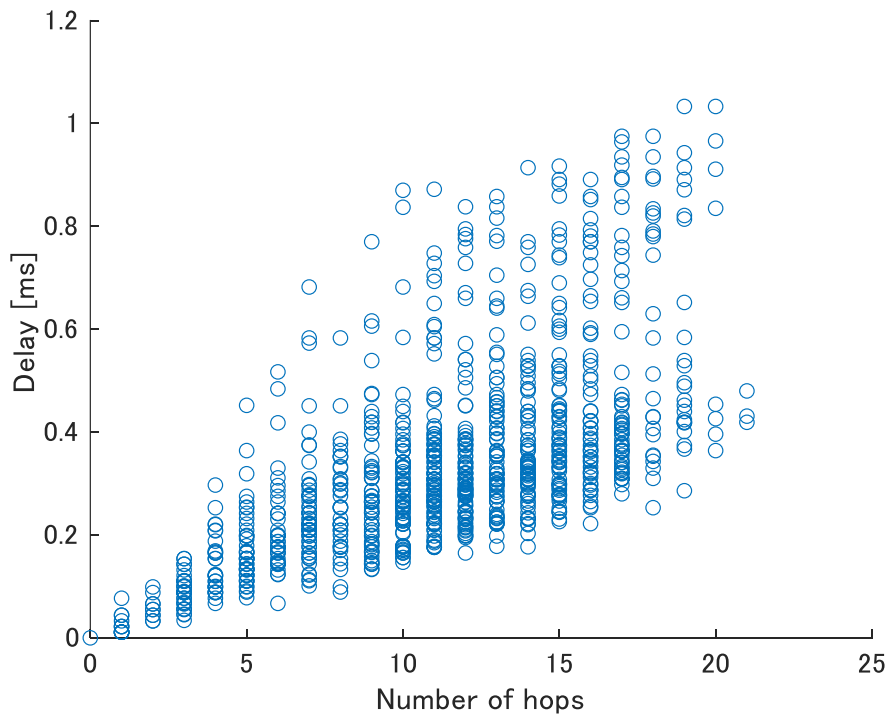


図 5.12 従来方式におけるホップ数-平均遅延時間の散布図（セッション数：1000）

次にセッション数を 100 とした時の提案方式及び従来方式における遅延時間のヒストグラムを図 5.13, 5.14 に示す。提案方式及び従来方式の平均遅延時間はそれぞれ 0.0944, 0.134 ms となった。提案方式の方が平均遅延時間は短いですが、2 方式の差はそこまで大きくないことが分かる。2 層へのパケットの分散により提案方式の方がキューにおける待ち時間が抑制されることで end-to-end の遅延時間が短くなるものと考えられる。しかしパケット数が少ないため、キューにおける待ち時間の抑制効果が少なく、2 方式の差は小さくなっている。

次にセッション数を 1000 とした時の提案方式及び従来方式における遅延時間のヒストグラムを図 5.15, 5.16 に示す。提案方式、従来方式の平均遅延時間はそれぞれ 0.289, 0.340 ms である。提案方式及び従来方式における遅延時間が集中しているピーク部分を比較すると、提案方式は 0.1~0.2 ms 付近、従来方式は 0.2~0.4 ms 付近である。よって提案方式では従来方式よりも遅延時間を抑制できているといえる。またセッション数が 100, 1000 の場合の 2 方式の結果を比較すると、セッション数が 1000 の時の方が遅延時間は大幅に大きいことが分かる。セッション数の増加により各衛星におけるキューの待ち時間が増大し、end-to-end の遅延時間が大きくなったと考えられる。

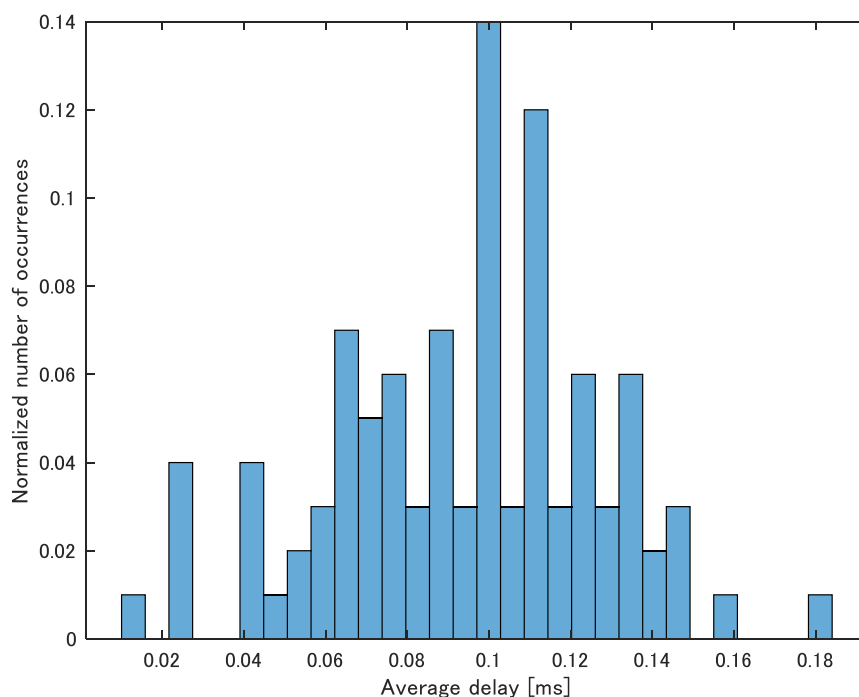


図 5.13 提案方式における遅延時間のヒストグラム (セッション数: 100)

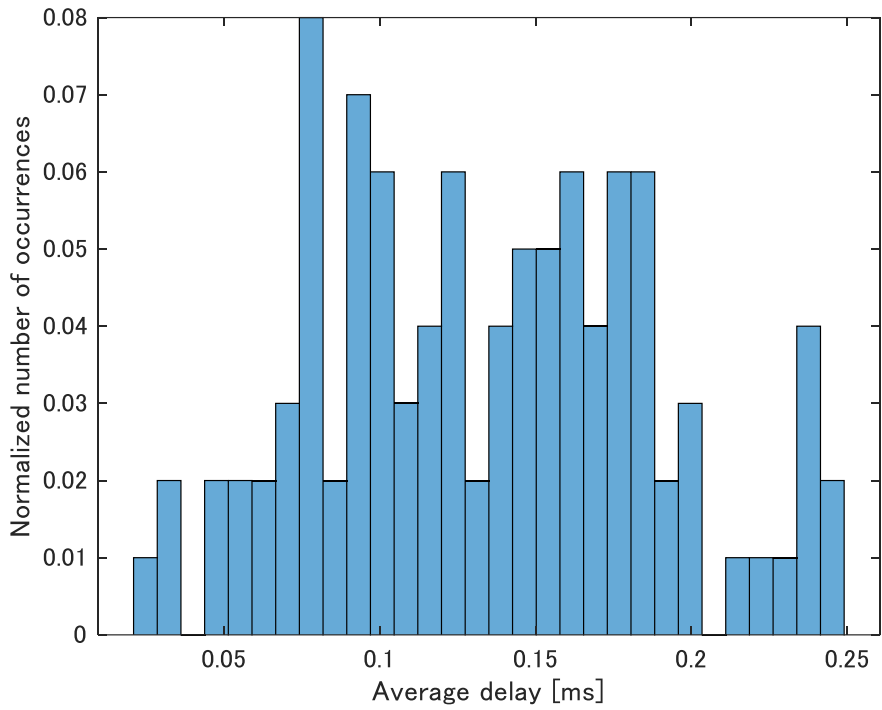


図 5.14 従来方式における遅延時間のヒストグラム (セッション数: 100)

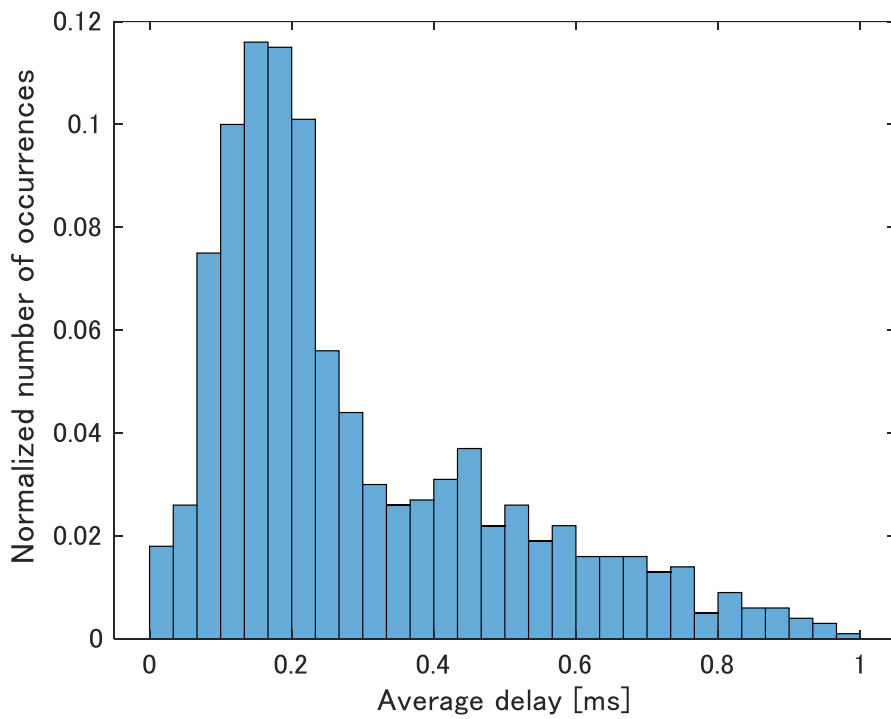


図 5.15 提案方式における遅延時間のヒストグラム (セッション数: 1000)

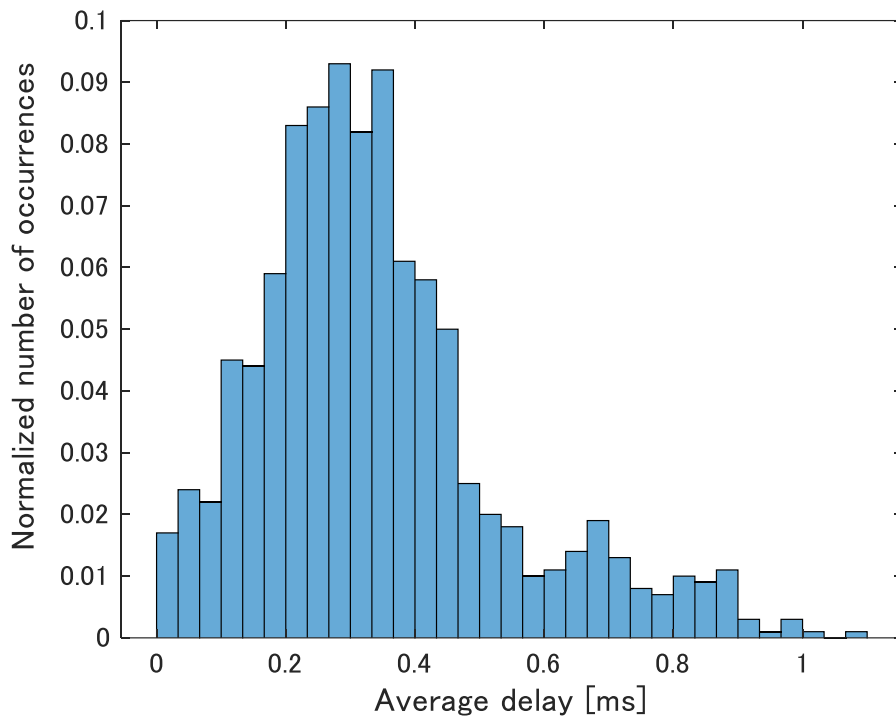


図 5.16 従来方式における遅延時間のヒストグラム (セッション数: 1000)

最後にセッション数を 100~2000 の間で変化させた時の提案方式及び従来方式における遅延時間を測定した結果を図 5.17 に示す。提案方式・従来方式共にセッション数の増加に伴い平均遅延時間も増大していることが分かる。また提案方式の方が従来方式よりも平均遅延時間は短くなっている。さらにセッション数の増加に伴い提案方式と従来方式の平均遅延時間における差が広がっている。これはセッション数の増加により提案方式におけるキューの待ち時間の抑制効果が大きくなることによるものと考えられる。

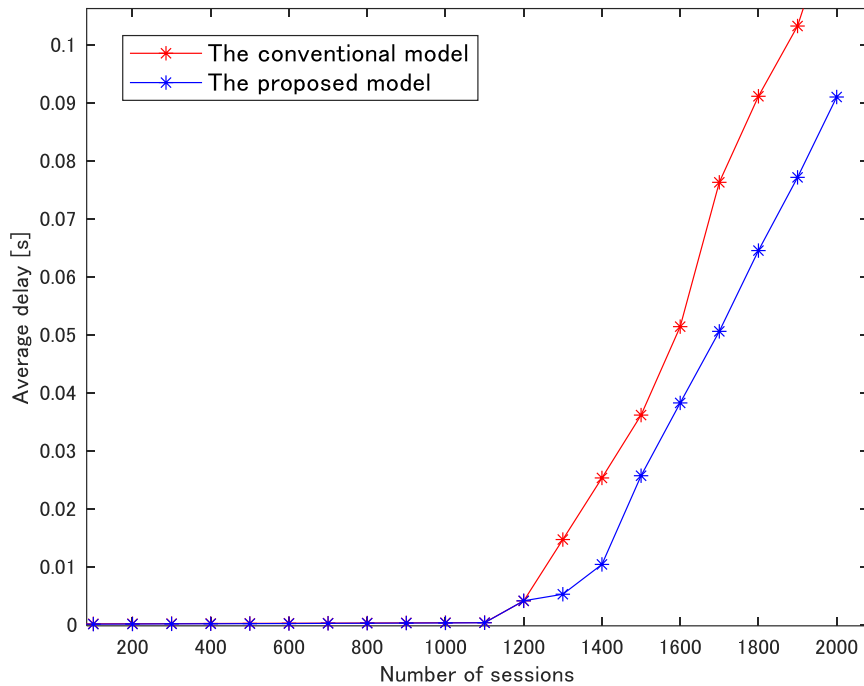


図 5.17 提案方式・従来方式の平均遅延時間の比較

5.4 小結論

本章では低軌道衛星・中軌道衛星を組み合わせたコンステレーションにおいて、NOMA 及び独自のルーティング手法を適用することで end-to-end の遅延時間を抑制する手法について提案した。提案方式では地上の送受信局間の距離が短い場合は従来方式と同様に低軌道衛星間のリンクのみを活用したルートを採用する。一方送受信局間の距離が長い場合は低軌道衛星間、低軌道衛星-中軌道衛星間、中軌道衛星間の 3 種類のリンクを組み合わせたルートを採用する。即ち距離が短い場合は低軌道衛星の層、長い場合は中軌道衛星の層を使用することでパケットを 2 層に分散させ、各衛星におけるキューの待ち時間を小さくすることで end-to-end の遅延時間を抑制する。さらに低軌道衛星-中軌道衛星間の通信にアップリンク NOMA を適用し、周波数利用効率を改善する。

シミュレーションでは低軌道衛星-中軌道衛星間に適用する NOMA の通信性能の検証及びコンステレーション全体における end-to-end の遅延時間の解析を行った。NOMA の通信性能の検証では、NOMA を適用した提案方式は OMA よりも BER は悪化するが、通信レートは大幅に向上することが分かった。また衛星間のチャンネル状態が推定可能であることを利用し、SINR の値を基に送信電力を決定する電力制御方式により、固定電力割当方式よりも通信精度及び通信速度が大幅に向上することを示した。end-to-end の通信性能の検証では、提案方式では伝播距離が長い通信において中軌道衛星を活用することで通信ホップ数を抑制できることが分かった。さらにパケットを 2 層に分散させること

で各衛星におけるキューの待ち時間を小さくし、低軌道衛星間のリンクのみを活用した従来方式よりも **end-to-end** の遅延時間を抑制できることが示すことができた。さらにセッション数の増加に伴い提案方式によるキューの待ち時間の抑制効果が大きくなり、従来方式との遅延時間の差が広がることから、ネットワーク内のパケット数が多くなるほど提案方式は従来方式に対する優位性を発揮することが分かった。

今後の展望としては、ルーティング方式についてさらに検討を進めていくべきであると考え。本論文では最短ホップ数の経路を選択するダイクストラ法を採用し、通信セッションが発生する確率は全世界均等であるものとしてシミュレーションを行った。しかし実際にはトラフィックが発生する確率は均等ではなく、一定の偏りがある。例えば海上よりも陸上の方がトラフィック要求の発生確率は高くなる。また先進国上空はより発生確率が高くなる。そのためトラフィックの発生確率の不均質性を考慮した上でルーティングに反映する手法についても検討する必要がある。具体的には、トラフィックの発生確率や各リンクの使用頻度を基にルートを選択率を変動させる手法や、各リンクの混雑度合いをリアルタイムに取得し、経路決定に反映する手法である。即ち通信ホップ数が最小の経路を必ずしも選択するのではなく、ネットワークの状態によっては経路の迂回を選択するルーティング手法である。この手法を適用することでネットワーク全体でより多くのトラフィックを扱えるようになり、**end-to-end** の遅延時間を抑制できると考える。シミュレーション条件についてもトラフィック発生確率の不均質性を反映した場合や、災害等により特定の地域で大量にトラフィック要求が発生した場合を想定し、提案方式の通信性能にどのような影響を与えるかを検証していくべきであると考え。また本研究では衛星間の光リンクのみに着目して研究に取り組んだため、衛星-地上間のリンクについては考慮していない。光リンクは雲や大気によりブロックされてしまうため、衛星-地上間のリンクはチャネルの状態によっては利用できない。そのためチャネル状態の良い衛星-地上局間のリンクを利用して地上にデータを送り、地上ネットワークを介して目標の受信局までデータを転送する手法についても検討されている。そのため衛星間だけでなく衛星-地上間のリンクを考慮してルーティング手法を検討していく必要がある。

6. 結論

本論文では非地上系ネットワークにおける NOMA・PDMA の適用に着目し、研究に取り組んだ。具体的には「地上-HAPS 間アップリンク通信における PDMA の適用に関する研究」、「衛星間通信における NOMA の適用に関する研究」、「周回衛星を用いたコンステレーションにおける NOMA の適用に関する研究」の3つの研究に取り組み、地上-HAPS 間、低軌道衛星間、低軌道衛星-中軌道衛星間の各領域において NOMA・PDMA を活用することで遅延時間等の通信性能を向上させる手法を検討した。

3章において述べた「地上-HAPS 間アップリンク通信における PDMA の適用に関する研究」では地上-HAPS 間の通信において PDMA を適用することで、電力領域における多重化により周波数効率を改善しつつ、ユーザ間の公平性を保証する手法を提案した。NOMA の場合ユーザ間の受信電力の差により通信レートにも大きな差が生じてしまう。PDMA では各ユーザの電力レベルを周期的に切り替えることでユーザ間の平均レートを近い値にし、ユーザ間の公平性を保証することができる。また提案方式ではチャネル状態に応じた光/ミリ波の切り替えやチャネル係数に応じた電力制御方式を実装した。シミュレーション結果より、PDMA を適用した提案方式は OMA よりも高いスループットを達成可能であることを示した。また NOMA を適用した方式よりも BER やスループットは悪化するが、ユーザ間の公平性は大幅に改善することを示した。これらのことから、PDMA を適用した提案方式は、電力領域における多重化による周波数利用効率の向上効果は NOMA よりも少し低下してしまうが、電力レベルの切り替えにより NOMA の弱点でもあるユーザ間の公平性を改善できる手法であるといえる。

4章において述べた「衛星間通信における NOMA の適用に関する研究」では、低軌道衛星間の通信に NOMA を適用する手法を提案した。複数の衛星を持つ衛星グループ間の通信を中継衛星によって中継する方式であり、衛星グループから中継衛星への通信にアップリンク NOMA、中継衛星から衛星グループへの通信にダウンリンク NOMA をそれぞれ適用した。シミュレーション結果より、提案方式では NOMA の適用により OMA よりも BER は低下するが、スループットは大幅に上昇することが分かった。極軌道の場合異なる軌道上の衛星間の距離は衛星の位置によって変動する。固定電力割当方式の通信性能はこの衛星間距離の変動の影響を強く受けることが分かった。一方提案した電力制御方式では、達成したい通信レートを基に衛星間距離から送信電力を逆算することで、変動する衛星間距離の影響を吸収し、一定の通信性能を維持できることが分かった。

5章において述べた「周回衛星を用いたコンステレーションにおける NOMA の適用に関する研究」では低軌道衛星に加えて中軌道衛星も搭載したコンステレーションにおいて、NOMA 及び独自のルーティング方式を適用することで遅延時間を抑制する手法について検討した。提案方式ではトラフィックの伝搬距離に応じて低軌道衛星の層と中軌道衛星の層にパケットを分散する。パケットの分散により各衛星におけるキューの待ち時

間が短くなるため、end-to-end の遅延時間は抑制される。さらに複数の低軌道衛星から 1 基の中軌道衛星に向けた通信にアップリンク NOMA を適用することで周波数利用効率を改善する手法を導入した。低軌道衛星-中軌道衛星間の通信における NOMA の適用に関するシミュレーションでは、NOMA を適用した提案方式は OMA よりも BER は悪化するが、スループットは向上することを示した。また 1 つのサブバンドにおいて多重化するユーザ数を増やすことでも BER は悪化するがスループットは向上することを示した。さらに各ユーザの SINR を均一に保つ電力制御方式により BER、スループットが向上することも分かった。end-to-end の通信性能によるシミュレーションでは、提案方式ではパケットの 2 層への分散により、遅延時間を抑制することを示した。さらにネットワーク中のパケット数が増加するほど、提案方式は従来方式に対する優位性を発揮することが分かった。

今回研究対象とした 3 領域それぞれにおいて、NOMA を適用することでスループット、遅延時間といった通信性能を改善できることが分かった。しかし NOMA を適用するためにはユーザ間で正確な同期をとる必要がある。NOMA を非地上系ネットワークに実装するためには各ユースケースにおいて同期やスケジューリングを行う手法についても詳細まで検討していく必要がある。また、今回提案したシステムにはそれぞれ各章の小結論で述べたような課題がある。3 章で述べた「地上-HAPS 間アップリンク通信における PDMA の適用に関する研究」では、PDMA におけるスケジューリングや電力制御方式を改善することで、ユーザ間の公平性を保証しつつ、BER やスループットを NOMA に近づける手法について検討する必要がある。4 章で述べた「衛星間通信における NOMA の適用に関する研究」では実際の end-to-end の通信の中で提案した方式を組み込む手法を考えるべきである。5 章で述べた「周回衛星を用いたコンステレーションにおける NOMA の適用に関する研究」では、各リンクの使用頻度や混雑度合いを考慮した上で経路を決定する手法を検討していく必要がある。

また今回は領域毎に検討を行ったが、非地上系ネットワークにおける各領域の特性を踏まえて統合的に NOMA を活用する手法を検討していくべきであると考え。例えば今回対象とした地上-HAPS 間、低軌道衛星間、低軌道衛星-中軌道衛星間に加え、HAPS 間、低軌道衛星-HAPS 間、HAPS-航空機間等も併せて統合的に通信性能を改善する手法を考えていくべきである。光通信は雲によりブロックされてしまうため、低軌道衛星から一度航空機にデータを送信し、雲の影響を受けない位置にいる航空機から地上に向けて光信号を送信する手法も検討されている[30]。このように各領域の特性を踏まえた上で統合的に活用しつつ、より高度な多重アクセス方式を活用することで通信性能を改善する手法について今後検討していきたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり，研究方針，内容等様々なご助言・ご指導をいただきました嶋本薫教授に深く感謝の意を表します。さらに日頃から様々なご助言をいただきました研究室の先輩，後輩，同期にも感謝致します。本当にありがとうございました。

業績

- [1] Wataru Tachikawa, Kazutoshi Yoshii, and Shigeru Shimamoto, “Performance Analysis of Uplink and Downlink NOMA System in Inter-Satellite Networks”, IEEE International Conference on Communications (ICC), Jun.2021
- [2] Wataru Tachikawa, Ajgaonkar Swarali Ashish, Kazutoshi Yoshii, Jiang Liu, and Shigeru Shimamoto, “Multi-layer Constellation based Is-OWC employing NOMA”, IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), pp.100-106, Mar.2022
- [3] Wataru Tachikawa, Akihito Suetsuna, Mao Wang, Kazutoshi Yoshii, and Shigeru Shimamoto, “Applying PDMA for Ground-HAPS Uplink Network with Hybrid FSO/RF Communication”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) WS-02: Next Generation Multiple Access (NGMA) for Future Wireless Communications, Mar.2023
- [4] Mao Wang, Wataru Tachikawa, Kazutoshi Yoshii, and Shigeru Shimamoto, “Performance Analysis of Terahertz Band in High Altitude Platform System Link with Non-orthogonal Multiple Access”, IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC) 2022-Fall, Sep.2022
- [5] Wataru Tachikawa, Kazutoshi Yoshii, and Shigeru Shimamoto, “Performance Analysis of PDMA System for Ground-HAPS Network with Hybrid FSO/RF Links”, Global information and Telecommunication Workshop (GITW), Dec.2022
- [6] Wataru Tachikawa, Kazutoshi Yoshii, and Shigeru Shimamoto, “Implementation of PDMA Scheme for Ground-HAPS Uplink Network with Hybrid FSO/RF Links”, 13th A3, Feb.2023

参考文献

- [1] Oltjon Kodheli, Alessandro Guidotti, and Alessandro Vanelli-Coralli, “Integration of Satellites in 5G through LEO Constellations”, IEEE Global Communications Conference, Dec.2017
- [2] Christian Fuchs and Florian Moll, “Ground station network optimization for space-to-ground optical communication links”, Journal of Optical Communications and Networking, Volume:7, Issue:12, pp.1148-1159, Dec.2015
- [3] Weijing Qi, et al., “A Unified Routing Framework for Integrated Space/Air Information Networks”, IEEE Access, Volume:4, pp.7084-7103, Oct.2016
- [4] 総務省, 「平成 23 年版 情報通信白書」, 2011 年, 2022 年 11 月 28 日閲覧
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h23/pdf/23honpen.pdf>
- [5] 総務省, 「令和 3 年版 情報通信白書」, 2011 年, 2022 年 11 月 28 日閲覧
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r03/pdf/01honpen.pdf>
- [6] Zhengquan Zhang, et al., “6G Wireless Networks Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies”, IEEE Vehicular Technology Magazine, Volume:14, Issue:3, pp.28-41, Sep.2019
- [7] Nikos Karafolas and Stefano Baroni, “Optical Satellite Networks”, Journal of Lightwave Technology, Volume:18, Issue:12, pp.1792-1806, Dec.2000
- [8] S. M. Riazul Islam, et al., “Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Volume:19, Issue:2, pp.721-742, Oct.2017
- [9] S. Shimamoto, Y. Onozato, and Y. Teshigawara, “Performance evaluation of power level division multiple access (PDMA) scheme” SUPERCOMM/ICC '92 Discovering a New World of Communications, pp.1333-1337, Jun.1992
- [10] Zhixiang Gao, Aijun Liu, and Xiaohu Liang, “The Performance Analysis of Downlink NOMA in LEO Satellite Communication System”, IEEE Access, Volume:8, pp.93723-93732, May.2020
- [11] Kang An, Xiaojuan Yan, Tao Liang, and Weixin Lu, “NOMA Based Satellite Communication Networks: Architectures, Techniques and Challenges”, IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT), Jan.2020, pp.1105-1110
- [12] Xue Sun and Suzhi Cao, “A Routing and Wavelength Assignment Algorithm Based on Two Types of LEO Constellations in Optical Satellite Networks”, Journal of Lightwave Technology, Volume:38, Issue:8, pp.2106-2113, Apr.2020
- [13] Ping Xie, Zhong-Shan Zhang, and Jin Zhang, “Inter-satellite routing algorithm by

searching the global neighborhood for dynamic inter-satellite networks”, Tenth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI), pp.673-678, Mar.2018

[14] Shanzhi Chen, Shaohui Sun, and Shaoli Kang, “System Integration of Terrestrial Mobile Communication and Satellite Communication —The Trends, Challenges and Key Technologies in B5G and 6G”, China Communications, Volume:17, Issue:12, pp.156-171, Dec.2020

[15] イリジウム社ホームページ, 2022年12月9日閲覧, <https://www.iridium.com/>

[16] Oneweb社ホームページ, 2022年12月9日閲覧, <https://oneweb.net/our-network>

[17] Telesat社ホームページ, 2022年12月9日,

<https://www.telesat.com/leo-satellites/>

[18] LeoSat社ホームページ, 2022年12月9日,

<https://www.leosat.com/to/technology/>

[19] Amazon社, 「Amazon makes historic launch investment to advance Project Kuiper」, 2022年12月9日閲覧,

<https://www.aboutamazon.com/news/innovation-at-amazon/amazon-makes-historic-launch-investment-to-advance-project-kuiper>

[20] 立川航, 「周回衛星を用いたコンステレーションにおけるアップリンク NOMA の適用に関する研究」, 早稲田大学 機関理工学部 情報通信専攻 卒業論文, 2020年

[21] Dong Zhou et al., “Overview of development and regulatory aspects of high altitude platform system”, Intelligent and Converged Networks, Volume: 1, Issue:1, pp.58-78, Jun.2020

[22] 長手厚史, 太田喜元, 星野兼次, 「迅速な災害復旧に向けた HAPS 移動通信システムの研究開発」, 電子情報通信学会, 2021年

[23] 雷 忠, 「太陽光エネルギーを利用した回転翼の技術課題」, Technical Journal of Advanced Mobility, Vol: 1, No: 1, pp.62-71, 2020年

[24] Shashank J. Bhatt, Kimaya Ambekar, “GOOGLE LOONS”, International Journal of Computer Engineering & Technology (IJCET), Volume:7, Issue:4, pp.59-66, Aug.2016

[25] Airbus, docomo, “Zephyr High Altitude Platform Station (HAPS) achieves connectivity in trial conducted by Airbus and NTT DOCOMO”, 2022年12月12日閲覧,

https://www.docomo.ne.jp/english/info/media_center/pr/2021/1115_00.html

[26] HAPS Mobile, SoftBank Corp. Develops Aircraft That Delivers Telecommunications Connectivity from the Stratosphere, 2022年12月12日閲覧

https://www.hapsmobile.com/en/news/press/2019/20190425_01/

[27] Aizaz U. Chaudhry and Halim Yanikomeroglu, “Free Space Optics for Next-Generation Satellite Networks”, IEEE Consumer Electronics Magazine, Volme:10, Issue:6,

pp.21-31, Nov.2021

- [28] F.S. Marzano, D. Carrozzo, S. Mori, and F. Moll, "Clear-air turbulence effects modeling on terrestrial and satellite free-space optical channels", 4th International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW), pp.36-40, Sep.2015
- [29] 荒木智宏, 「大容量通信を実現する宇宙光通信の研究開発動向」, 電子情報通信学会, 2019年
- [30] 片岡愛, 「Study of Active-Site-Diversity Using Aircraft for Satellite-to-Earth Optical Wireless Communication」, 早稲田大学 基幹理工学研究科 情報理工・情報通信専攻 201 修士論文, 2016年
- [31] Christian Fuchs and Florian Moll, "Ground station network optimization for space-to-ground optical communication links", Journal of Optical Communications and Networking, Volume:7, Issue:12, pp.1148-1159, Dec.2015
- [32] Takashi Eishima, et al., "RF and Optical Hybrid LEO Communication System for Non-Terrestrial Network", IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), pp.93-99, Apr.2022
- [33] Michael Rani, and Shanthi Prince, "A study on inter-satellite optical wireless communication and its performance analysis", International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS), Apr.2012
- [34] Kripa Vimal, and Shanthi Prince, "System analysis for optimizing various parameters to mitigate the effects of satellite vibration on inter-satellite optical wireless communication", IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES). Feb.2015
- [35] ベンジャブール アナス, 齊藤敬佑, 齋藤祐也, 岸山祥久, 「5G 無線アクセス技術」, NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル, Vol:23, No;4, 2016年
- [36] 山里敬也, 「多重化・多重アクセス方式の基礎」, Microwave Workshops and Exhibition (MWE), 2005
- [37] S. M. Riazul Islam, Nurilla Avazov, Octavia A. Dobre, and Kyung-Sup Kwak, "Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges", IEEE Communications Surveys & Tutorials, Volume:19, Issue:2, pp.721-742, Oct.2016
- [38] Linglong Dai et al., "Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends", IEEE Communications Magazine, Volume:53, Issue:9, pp.74-81, Sep.2015
- [39] Ashish Rauniyar, Paal E. Engelstad, and Olav N. Østerbø, "On the Performance of Bidirectional NOMA-SWIPT Enabled IoT Relay Networks", IEEE Sensors Journal, Volume:21, Issue:2, pp.2299-2315, Jan.2021

- [40] S. Shimamoto, Y. Onozato, Y. Teshigawara, "Performance evaluation of power level division multiple access (PDMA) scheme", SUPERCOMM/ICC '92 Discovering a New World of Communications, pp.1333-1337, Jun.1992
- [41] Zheng Yang et al., "A General Power Allocation Scheme to Guarantee Quality of Service in Downlink and Uplink NOMA Systems", IEEE Transactions on Wireless Communications, Volume:15, Issue:11, pp.7244-7257, Aug.2016
- [42] Yosuke Higasa, Kazutoshi Yoshii, Megumi Saito, Jiang Liu, Shigeru Shimamoto, Takuya Okura, Naoko Yoshimura, Amane Miura, Hiroyuki Tsuji, and Morio Toyoshima, "Performance Analysis of DSSS-PDMA with SIC in GEO Satellite-Terrestrial Uplink Networks", 24th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Feb.2022
- [43] R. Hadani et al., "Orthogonal Time Frequency Space Modulation", IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Mar.2017
- [44] K. R. Murali, and A. Chockalingam, "On OTFS Modulation for High-Doppler Fading Channels", Information Theory and Applications Workshop (ITA), Feb.2018
- [45] Anusha Gunturu et al., "Performance Analysis of OTFS Waveform for 5G NR mmWave Communication System", IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2021
- [46] Matthew Bliss, "Uplink NOMA for Heterogeneous NTN with LEO Satellites and High-Altitude Platform Relays", IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp.172-177, Apr.2022
- [47] İrem Cumali, "User Selection and Codebook Design for NOMA-Based High Altitude Platform Station (HAPS) Communications", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Nov.2022
- [48] Maged Abdullah Esmail, Habib Fathallah, and Mohamed-Slim Alouini, "Analysis of fog effects on terrestrial Free Space optical communication links", IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), May.2016
- [49] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, "Optical Wireless Communications", CRC Press, 2018
- [50] Anjitha Viswanath, V. K. Jain, and Subrat Kar, "Performance evaluation of satellite-to-earth FSO link in presence of turbulence and weather conditions for different IM schemes", Twenty Second National Conference on Communication (NCC), Mar.2016
- [51] Yana Kremenetskaya et al., "Optical-Radio Hybrid Technology in Multilayer Non-Terrestrial Telecommunications", IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), pp.103-108, Dec.2021
- [52] ITU-R, "Attenuation by atmospheric gases", Recommendation ITU-R P.676-11,

Sep.2016

- [53] Marco Giordani, and Michele Zorzi, “Satellite Communication at Millimeter Waves: a Key Enabler of the 6G Era”, International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), pp.383-388, Feb.2020
- [54] 3GPP, “Study on New Radio (NR) to support non terrestrial networks”, TR 38.811 (Release 15), 2018
- [55] Zu-Kai Weng et al., “Millimeter-Wave and Terahertz Fixed Wireless Link Budget Evaluation for Extreme Weather Conditions”, IEEE Access, Volume:9, pp. 163476-163491, Dec.2021
- [56] ITU-R, “Specific attenuation model for rain for use in prediction methods”, Recommendation ITU-R P.838-3, 2005
- [57] Ming Zeng et al., “Power Minimization for Multi-Cell Uplink NOMA With Imperfect SIC”, IEEE Wireless Communications Letters, Volume:9, Issue:12, pp.2030-2034, Jul.2020
- [58] 国土交通省気象庁, 「過去の気象データ・ダウンロード」, 2022年7月18日閲覧, <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/>
- [59] Anatoly M. Galkin, and Gennady G. Yanovsky, “Resource allocation in multiservice networks using fairness index”, pp.1810-1814, IEEE EUROCON, Jul.2
- [60] Wataru Tachikawa, Kazutoshi Yoshii, and Shigeru Shimamoto, “Performance Analysis of Uplink and Downlink NOMA System in Inter-Satellite Networks”, IEEE International Conference on Communications (ICC), Jun.2021
- [61] Allan Anzagira, and William Edmonson, “Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for LED-based Visible Light Inter-Satellite Communications”, 6th IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE), pp.24-29, Dec.2018
- [62] Somanath Pradhan et al., “Inter-satellite optical wireless communication system design using diversity techniques”, International Conference on Microwave, Optical and Communication Engineering (ICMOCE), pp.250-253, Dec.2015
- [63] Shichao Wang, Bin Wu, and Bo Wang, “Research on Doppler characteristics of inter-satellite-links in Beidou-based Space Information Network”, IEEE International Conference on Information and Automation, pp.2910-2914, Aug.2015
- [64] Valentin R. Anpilogov et al., “A Conflict in the Radio Frequency Spectrum of LEO-HTS and HEO-HTS Systems”, Engineering and Telecommunication (EnT-MIPT), pp.122-125, Nov.2018
- [65] Shiyi Xia et al., “Beam Coverage Comparison of LEO Satellite Systems Based on User Diversification”, IEEE Access, Volume:7, pp.181656-181667, Dec.2019
- [66] Wataru Tachikawa, Ajgaonkar Swarali Ashish, Kazutoshi Yoshii, Jiang Liu, and Shigeru

Shimamoto, “Multi-layer Constellation based Is-OWC employing NOMA”, IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), pp.100-106, Mar.2022