

# フレキシブルな大容量衛星通信システムの性能評価に関する研究

著者	金子 和真
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	11301甲第18198号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/00122885">http://hdl.handle.net/10097/00122885</a>

# 博士學位論文

論文題目 フレキシブルな大容量衛星通信  
システムの性能評価に関する研究

提出者 東北大学大学院情報科学研究科  
応用情報科学専攻

学籍番号 B5ID4003

氏名 金子 和真

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の目的	3
1.3	本論文の構成	4
<b>第2章</b>	<b>衛星通信システムの現状</b>	<b>5</b>
2.1	はじめに	5
2.2	ハイスループット衛星の開発動向	6
2.3	衛星通信システムの柔軟性	6
2.3.1	デジタルチャネライザ	9
2.3.2	ビームホッピング	13
2.4	関連研究	14
2.5	まとめ	16
<b>第3章</b>	<b>衛星通信システムのモデル化と柔軟性評価</b>	<b>17</b>
3.1	はじめに	17
3.2	想定する衛星通信システム	18
3.3	衛星通信システムのモデル化	21
3.3.1	ベントパイプ型衛星での通信	23
3.3.2	チャネライザ搭載衛星での通信	25

---

3.4	性能評価 . . . . .	30
3.5	まとめ . . . . .	35
<b>第4章</b>	<b>システム解析の基礎モデルの構築</b>	<b>37</b>
4.1	はじめに . . . . .	37
4.2	提案するシステム解析モデル . . . . .	38
4.3	ハイブリッド型中継器 . . . . .	40
4.4	ハイブリッド型中継器搭載衛星の通信のモデル化 . . . . .	41
4.5	ハイブリッド型中継器搭載衛星への要求定義 . . . . .	50
4.6	性能評価 . . . . .	54
4.7	まとめ . . . . .	62
<b>第5章</b>	<b>システム解析モデルの適用</b>	<b>63</b>
5.1	はじめに . . . . .	63
5.2	ビームホッピングの通信のモデル化 . . . . .	64
5.3	ビームホッピングを行う衛星通信システムへの 要求定義 . . . . .	68
5.4	性能評価 . . . . .	71
5.5	まとめ . . . . .	82
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>83</b>
	著作物利用許諾	86
	参考文献	89
	発表文献一覧	94
	謝辞	99

# 目次

2.1	デジタルチャネライザの構造	9
2.2	二つの接続方式	10
2.3	スター型通信でのチャネライザの機能	11
2.4	メッシュ型通信でのチャネライザの機能	12
2.5	ビームホッピング	14
3.1	衛星通信システムの全体像	18
3.2	衛星通信システムのフレーム構造	19
3.3	衛星通信システムの周波数配置	20
3.4	衛星通信システムモデル	21
3.5	着目しているビームでのチャンネル割当	22
3.6	ベントパイプ衛星でのトラヒック損失	24
3.7	デジタルチャネライザを用いたチャンネル割り当て	26
3.8	宛先ビームの分別	27
3.9	チャネライザ搭載衛星でのトラヒック損失	28
3.10	$L_{BP}$ (分散大)	29
3.11	$L_{BP}$ (分散小)	29
3.12	$L_{DC}$ (分散大)	30
3.13	$L_{DC}$ (分散小)	30
3.14	要求チャンネル数の平均が 10 の場合	32

---

3.15	要求チャンネル数の平均が 15 の場合	33
4.1	システム解析の基礎モデルの概要図	38
4.2	ハイブリッド型中継器	40
4.3	周波数配置	42
4.4	各宛先ビームへのチャンネル割り当て	44
4.5	ビーム 1 からのトラヒックに対して割り当てられるチャンネルのモデル化	45
4.6	ビーム 1 へのトラヒックに対して割り当てられるチャンネルのモデル化	45
4.7	所望チャンネル数の発生分布	53
4.8	$d_{ij}$ の存在範囲 (平均小)	53
4.9	$d_{ij}$ の存在範囲 (平均大)	53
4.10	$d_{ij}$ (ばらつきの範囲小)	54
4.11	$d_{ij}$ (ばらつきの範囲大)	54
4.12	要求範囲	54
4.13	評価空間	55
4.14	評価空間におけるトラヒック収容率の改善量	57
4.15	Case1( $\Delta\mu = 1$ )	58
4.16	Case2( $\Delta\mu = 5$ )	58
4.17	Case3( $\mu = 8$ )	59
4.18	Case4( $\mu = 5$ )	59
4.19	システム構成に対する周波数フレキシビリティ性の定量評価	61
5.1	セルとビーム	64
5.2	偏波割り当て	65
5.3	クラスタ	66
5.4	要求レートの地理的分布	70

---

5.5	ピーク数が1の場合 . . . . .	70
5.6	ピーク数が3の場合 . . . . .	70
5.7	標準偏差が小さい場合 . . . . .	71
5.8	標準偏差が大きい場合 . . . . .	71
5.9	評価空間 . . . . .	72
5.10	評価空間におけるスループット . . . . .	73
5.11	ピーク数が1の場合のスループット . . . . .	74
5.12	ピーク数が6の場合のスループット . . . . .	75
5.13	増幅器数が50, 標準偏差が6の場合 . . . . .	76
5.14	増幅器数が10, 標準偏差が5の場合 . . . . .	77
5.15	増幅器数が10, 標準偏差が6の場合 . . . . .	78
5.16	標準偏差が6の場合のスループット . . . . .	79
5.17	標準偏差が9の場合のスループット . . . . .	80
5.18	評価空間の被覆率 . . . . .	81

# 表 目 次

2.1	HTS 衛星を運用する衛星事業者 (計画中を含む) 1 . . . . .	7
2.2	HTS 衛星を運用する衛星事業者 (計画中を含む) 2 . . . . .	8
3.1	トラヒック損失の解析におけるパラメータ一覧 . . . . .	31
4.1	ハイブリッド型中継器搭載衛星の通信モデルにおけるパラメータ 定義1 . . . . .	51
4.2	ハイブリッド型中継器搭載衛星の通信モデルにおけるパラメータ 定義2 . . . . .	52
4.3	ハイブリッド型中継器の柔軟性解析におけるパラメータ設定1 . . .	56
4.4	ハイブリッド型中継器の柔軟性解析におけるパラメータ設定2 . . .	57
5.1	ビームホッピングを行う衛星通信システムのパラメータ定義 . . .	68
5.2	ビームホッピングを行う衛星通信システムの解析におけるパラメータ 設定 . . . . .	72





# 第1章

## 序論

### 1.1 本研究の背景

近年の社会経済活動のグローバル化に伴い衛星通信に対する更なるブロードバンド化へのニーズは増大している。その要因として海洋資源探査などの海域での通信需要の増加に加え航空機での大容量通信サービスの需要の高まりが挙げられる。また、IoT時代の到来により多くの機器がネットワークに接続されることとなり、そのような機器への通信手段としても衛星通信システムが期待されている [1-4]。さらに無人航空機が多大な注目を集め、インフラ点検や環境調査など多様な利用用途が検討されているが、無人航空機は必ずしも地上ネットワークの電波到達範囲内を飛行するとは限らない。利用用途によっては無人航空機が取得したデータを収集することはもちろん、無人航空機の制御すら困難である場合が想定されるため、無人航空機との通信手段としても衛星通信システムの利用が検討されている [5-7]。また、衛星通信システムは災害時における利用も可能であるため、大規模災害時の非常用通信手段としても活用されている。2011年3月に発生した東日本大震災では多くの携帯電話基地局が倒壊し、広範囲にわたって通

信インフラが使用不能となったが通信環境を確保するための手段として衛星通信システムが利用され、衛星通信が災害に強いということが改めて認識された。また、今後発生することが予想されている南海トラフ大地震の災害対策計画においても衛星通信を用いた災害対応活動が計画されている。このように衛星通信システムの災害利用はかねてから行われており、今後もこのような利活用が継続されていくことが予想される。災害の絶えない日本では更に高度な災害対応を行うための被災状況等の高精細映像の伝送といった大容量通信のニーズも高まりつつあるため、衛星通信システムには更なる大容量化が求められている。一方、衛星通信において使用可能な周波数帯域は限られており Ku 帯と呼ばれる比較的低い周波数帯では衛星先進国が占有しているため世界的に周波数の逼迫が懸念されている。そこで、現在 Ka 帯と呼ばれる高い周波数帯を使用する衛星が登場しつつある。近年の衛星通信では周波数利用効率向上のため複数のビームで通信環境を提供するマルチビーム衛星が一般的となっている [8–13]。マルチビーム衛星では各ビームに異なる周波数を割り当てるが、セルラーシステムのようにビームごとに割り当てる周波数を繰り返し使用することによって周波数利用効率の向上を図っている。欧米では上記の周波数の逼迫に対処するとともに衛星通信システムの更なるブロードバンド化を目指し、ハイスループット衛星 (HTS: High Throughput Satellite) と呼ばれる衛星通信システムの開発が進んでいる [14–17]。しかし、現在の HTS では通信リソースの割り当てが固定的であるため、トラフィック要求が時間的・空間的に不均一に発生する場合、周波数利用効率が低下するという課題がある。これはトラフィック要求の少ないビームに対して余分に周波数を割り当て、トラフィック要求が多いビームで周波数が不足するというようなケースが発生するためである。次世代の衛星通信システムにはシステムに対する要求やシステムを

取り巻く環境が変化していく中でも柔軟にリソースを配分し、高い性能を維持することが求められている [18–21]. そのため、打ち上げ後であっても柔軟にリソース配分の変更が可能な周波数フレキシビリティ化技術としてデジタルチャネライザやデジタルビームフォーミング技術, そしてビームホッピング技術の開発が進んでいる [22–25]. 衛星通信システムへの需要を満たすためにはこのような周波数フレキシビリティ化技術の有効性を正確に評価し, 有効な利用法を決定する必要がある. しかし, システムを取り巻く状態変化に対応したシステム評価モデルは存在せず, 状態の変化を伴う中で衛星通信システムの周波数柔軟性を定量的に評価することは難しい. ここで, システムを取り巻く状態とはシステムに対するユーザからの要求のことを指す. 衛星通信システムの有効性はその性能だけでなくユーザからの要求にも左右されるため, 有効な衛星通信システムを構築するためにはユーザの要求をどの程度満足しているかという視点が必要不可欠である. そのため, 衛星通信システムの有効性を評価するためには, ユーザの要求を評価モデルに反映する必要がある. 現状ではこのような視点に基づいた評価モデルが存在していないため, チャンネルの構成等が異なる衛星通信システムに対して優劣をつけることができない. その結果, 周波数フレキシビリティ化技術の有効性評価には至っていない. そこで, 本研究では要求や環境が変化しても衛星通信システムを定量評価可能なモデル構築を行う.

## 1.2 本研究の目的

本研究では, 複数のシステム構成を構築可能な衛星通信システム, 即ち周波数柔軟性を有する衛星通信システムに対して, システム構成の優劣をつけることを可能とするシステム評価モデルを構築することが目的である. 前述の通り構築す

る評価モデルでは各ビームにおけるトラヒック要求などの変動条件による影響を反映させる。また、このような変動条件によって定義される状態は常に変動していくため、状態が変化していく中で衛星通信システムが有する周波数柔軟性の評価が可能な評価モデルの構築を行う。本研究ではそのような状態変化の中で各状態におけるシステム構成の有効性について定量評価を行う。また、状態変化を総合的に考慮した上でのシステム構成の評価を行う。

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第1章は序論であり、本研究の背景とその目的について述べた。第2章では、衛星通信システムの現状としてハイスループット衛星の開発動向とハイスループット衛星の持つ柔軟性について述べる。さらに、関連研究について説明を行い、本研究の位置づけを明確化する。第3章では、チャネライザ搭載衛星通信システムのモデル化を行い、チャネライザ搭載衛星の柔軟性評価を行う。第4章では、システム解析の基礎モデルを構築し、第3章でモデル化を行ったチャネライザ搭載衛星の柔軟性についてシステム解析モデルを用いた柔軟性評価を実施する。第5章では、構築したシステム解析モデルをビームホッピング機能を有する衛星通信システムに適用し、その柔軟性評価を実施する。第6章は結論であり、本論文のまとめである。

## 第2章

# 衛星通信システムの現状

### 2.1 はじめに

本章では衛星通信システムの現状として世界的に開発が進むハイスループット衛星の開発動向について述べる。また、衛星の通信リソースを柔軟に使用するための技術としてデジタルチャネライザ搭載衛星の機能について説明を行う。そして、ビームホッピング機能についても説明を行い、衛星通信システムの柔軟性についてまとめる。さらに、デジタルチャネライザとビームホッピングにおける関連研究についてまとめ、衛星通信システムの柔軟性を定量評価するための解析モデルの必要性について説明を行う。

## 2.2 ハイスループット衛星の開発動向

ハイスループット衛星とは同じ帯域幅で従来衛星と比較して少なくとも2倍以上にスループットを向上させた高速大容量の衛星を指すことが一般的である。ハイスループット衛星の多くはKa帯という高い周波数帯を使い、多数のビームを用いることで大きなスループットを達成している。Ka帯利用においては衛星の高出力増幅器の中心部となるKa帯進行波管(TWT: Traveling Wave Tube)の供給におけるボトルネックが存在しており、現状でもKa帯TWTは市場規模や参入コスト等の障壁から2社のみが市場シェアの9割近くを独占している。しかし、第1章でも述べたようにC帯やKu帯等の比較的低い周波数帯域は既に飽和状態であることもあり、ハイスループット衛星開発が世界規模で進んでいる。表2.1, 2.2に2015年2月までに打ち上げられているハイスループット衛星と打ち上げが予定されているハイスループット衛星をまとめる[26]。25の衛星事業者がKa帯を利用したハイスループット衛星の打ち上げを計画しており、15の衛星事業者については2015年2月までにハイスループット衛星を既に打ち上げている。また、Intelsat EpicやSES17といったハイスループット衛星には柔軟性を獲得するためにデジタルチャネライザという機器が搭載される予定である。次節ではデジタルチャネライザの特徴と機能について述べる。

## 2.3 衛星通信システムの柔軟性

本節では衛星通信システムにおける通信リソースを柔軟に使用するための技術としてデジタルチャネライザとビームホッピングについて紹介する。

表 2.1: HTS 衛星を運用する衛星事業者 (計画中を含む) 1

事業者名	国	主な HTS 衛星 (打ち上げ済)	主な HTS 衛星 (計画)
Arabsat	アラブ諸国	Arabsat 5B, 5C	Arabsat 6B
Avanti	イギリス	Hylas 1,2	Hylas 3,4
China Satcom	中国	-	Chinasat 16
Direc TV	アメリカ	Direc TV 10,11,12,14	Direc TV 15
Eutelsat	欧州	KA-SAT, Eutelsat 25B,3B	Eutelsat 172B
Gazprom	ロシア	-	Yamal 601
Hispasat	スペイン	Amazonas 3	Amazonas 5
Echo Star (HNS)	アメリカ	Spaceway 3, Echostar 17	Echostar 19
Inmarsat	国際	Global Express I-5(2機)	Global Express I-5(2機)
INSAT	インド	-	GSAT-11
Intelsat	国際	-	Intelsat Epic(全6機)
NBN	オーストラリア	-	NBN-1A,1B



表 2.2: HTS 衛星を運用する衛星事業者 (計画中を含む) 2

事業者名	国	主な HTS 衛星 (打ち上げ済)	主な HTS 衛星 (計画)
Newsat	オーストラリア	-	Jabiu-1
O3b	イギリス	O3b(全 12 機)	O3b(第二世代)
RSCC	ロシア	Ekspress AM5, AM6	Ekspress AM8
SES	ルクセンブルグ	Astra 2E, 2F, 2G	SES 12, 14, 15, 16
Spacecom	イスラエル	AMOS 4	AMOS 6
Star One	ブラジル	-	Star One D1
Thaicom	タイ	IPstar 1	-
Telesat	カナダ	Anik F2	Telstar 12 Vantage
Telenor	ノルウェー	-	Thor 7
Turksat	トルコ	-	Turksat 4B
Viasat	アメリカ	Wildblue, Viasat-1	Viasat-2, X
Visiona Brazil	ブラジル	-	SDGC
Yahsat	UAE	Yahsat-1A, 1B	AI Yah 3

### 2.3.1 デジタルチャネライザ

デジタルチャネライザとは衛星搭載用の中継器の一種である。衛星搭載用中継器とは地上からの微弱な信号を衛星上で増幅するための機器である。また、受信した信号の周波数を地上に送信するための周波数に変換することも中継器の大きな役割である。中継器の役割はこの2点であるが、デジタルチャネライザはこの2点に加え、信号の分波・合波という機能を持つ。デジタルチャネライザの構造を図2.1に示す。続いてデジタルチャネライザを搭載することで得られる利点に

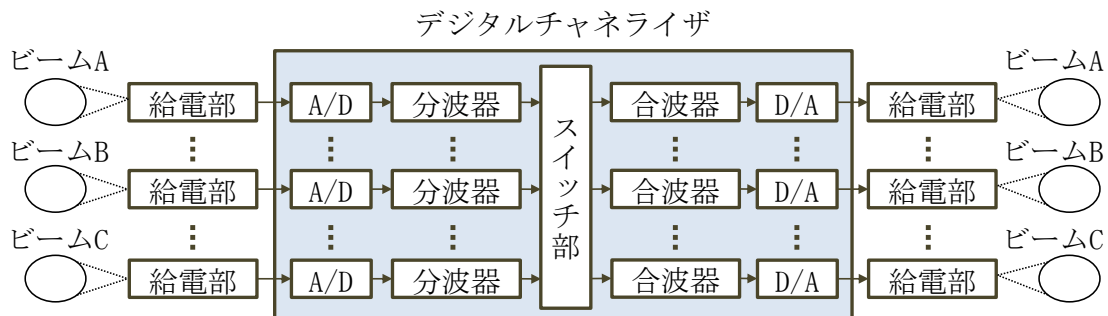


図 2.1: デジタルチャネライザの構造

ついて説明する。デジタルチャネライザ搭載衛星ではスター型とメッシュ型という二つの接続方式を同時に実現することが可能である [27], [28]。スター型通信の概要を図2.2(a)に示す。スター型通信では全てのトラヒックが必ずゲートウェイを経由するという特徴がある。そのため、衛星ネットワーク内での通信であっても一度ゲートウェイを経由する必要があるため、遅延が大きくなるという課題が存在している。一方、メッシュ型通信では図2.2(b)に示すように衛星ネットワーク内の通信においてゲートウェイを経由することなく衛星を介して通信を行うことが可能である。従来の衛星通信システムにおいては中継器の構造上どちらか一方の

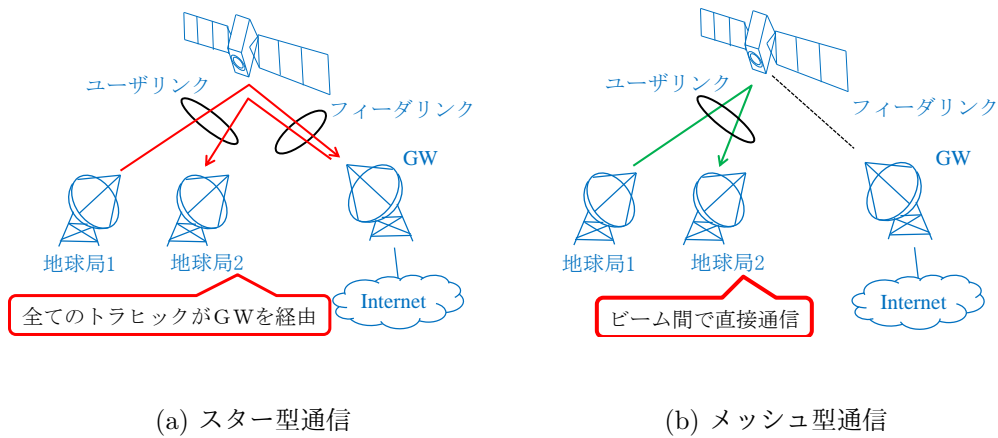
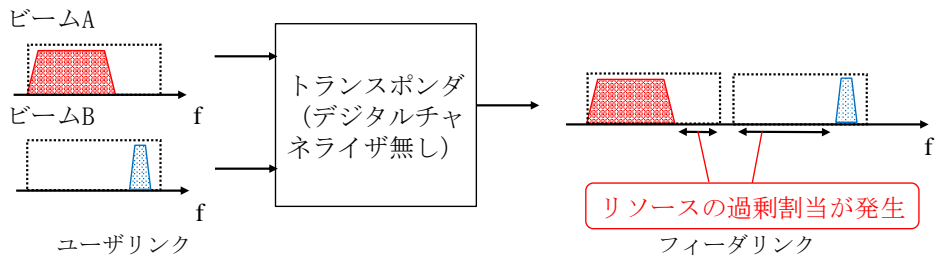


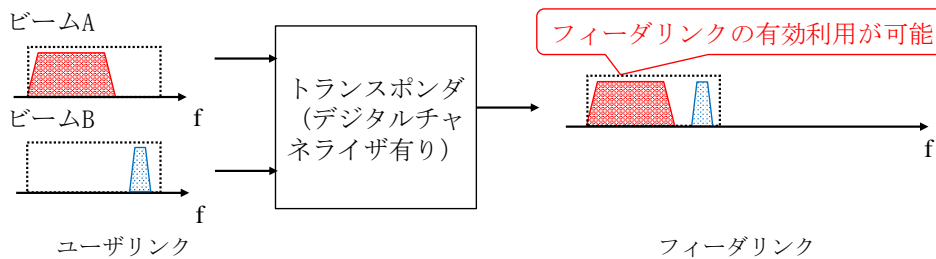
図 2.2: 二つの接続方式

接続方式を採用しなければならず一般的にはスター型通信を採用していた。メッシュ型通信は衛星ネットワーク内に閉じた通信であり、衛星とゲートウェイを繋ぐフィーダリンクを使用することができないため衛星ネットワーク外と通信することができない。そのため、衛星ネットワーク内と外部の通信をどちらも行うためメッシュ型通信ではなくスター型通信が採用されていた。

次に、スター型通信におけるデジタルチャネライザの利点について説明する。図2.3のようにビームAとBでトラフィックが発生し衛星に送信される場合、デジタルチャネライザを搭載していないトランスポンダでは受信した信号をそのままゲートウェイに送信する。このとき、図2.3(a)のように各ビームに対するリソース割当量に空きがある場合でも空きがあるままフィーダリンクに送信するためフィーダリンクにおいてリソースの過剰割当が発生する。一方、デジタルチャネライザ搭載衛星の場合では衛星上で各ビームからの信号に対してリソースの再割当を行うため、図2.3(b)に示すようにフィーダリンクにおけるリソースの過剰割当が発生しない。そのため、デジタルチャネライザ搭載衛星ではフィーダリンク



(a) ベントパイプ中継の場合

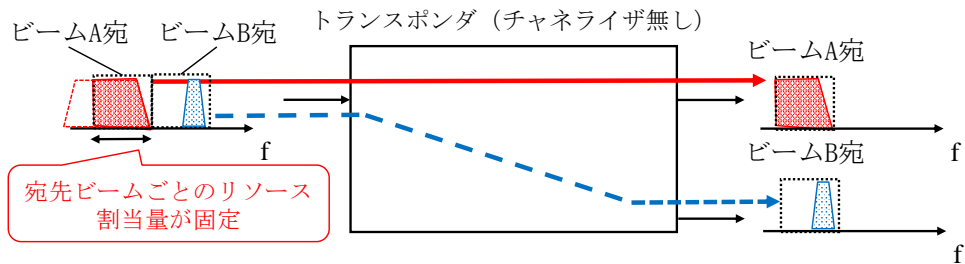


(b) チャネライザ搭載衛星の場合

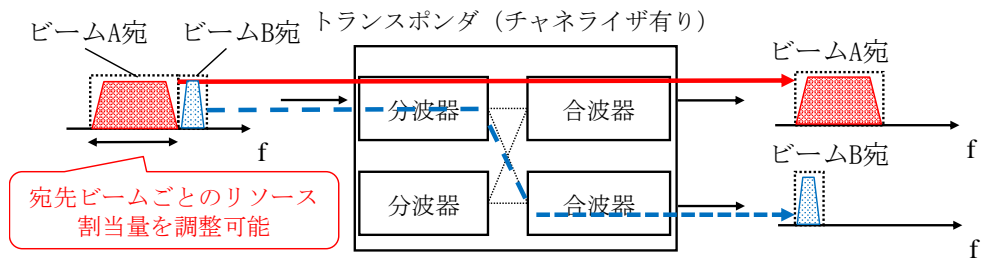
図 2.3: スター型通信でのチャネライザの機能

の周波数帯域の有効利用が可能となる。

次に、メッシュ型通信におけるデジタルチャネライザの利点について説明する。図2.4に示すようにあるビームにおいてビーム A 宛てのトラヒックとビーム B 宛てのトラヒックが発生していた場合、デジタルチャネライザを搭載していないトランスポンダでは各宛先ビームごとへのリソース割当量が固定されている。そのため、宛先ビームごとに発生しているトラヒックに偏りがあった場合、ある宛先ビームに対してはリソースを過剰に割当て別の宛先ビームに対してはリソースが不足するという状況が発生し得る。図2.4(a)の例ではビーム A 宛てのトラヒックが大きくビーム B 宛てのトラヒックが小さい場合であり、ビーム B 宛てのトラ



(a) ベントパイプ中継の場合



(b) チャネライザ搭載衛星の場合

図 2.4: メッシュ型通信でのチャネライザの機能

ヒックには過剰にリソースが割り当てられている一方ビーム A 宛でのトラヒックでは一部のトラヒックを送信しきれていない。これに対し，デジタルチャネライザ搭載衛星では発生しているトラヒックに応じてリソース割当量を調整することができるため通信リソースの有効利用が可能である。図 2.4(b) の例では図 2.4(a) の場合と発生しているトラヒックの総量は同じであるのにも関わらずデジタルチャネライザの機能によって全てのトラヒックの送信が可能となっている。

本研究では特にトラヒックの宛先ごとにリソース配分を変更可能であるという性質に着目し，柔軟性解析を行う。

### 2.3.2 ビームホッピング

衛星通信システムでは周波数利用効率を向上させるため、広大なカバー範囲を複数のビームで覆うことで通信環境を提供している。大規模な衛星通信システムではビーム数が100に及ぶ場合もある。衛星通信では地上からの信号を衛星に搭載された中継器で増幅をして地上へと送信を行う。そのため、微弱な信号を増幅するための増幅器が衛星通信システムには必要不可欠である。前述の通り衛星通信システムでは複数のビームを照射しており、照射するビーム数分の増幅器が必要となる。衛星搭載用の増幅器は非常にコストが大きい機器であるため衛星通信システムを構築する際に大きな課題となっている。そのため、衛星通信システムのカバー範囲を変更することなく増幅器の数を削減することが可能となるビームホッピング技術に注目が集まっている [29, 30]。ビームホッピングでは同時に全てのビームを照射するのではなく、エリアごとにビームを照射する時間をずらすことにより増幅器の削減を図っている。図2.5にビームホッピングの概要を示す。ビームを照射する候補のエリアをセルと呼称するが、左の図ではセル数が9であるのに対し、同時にビームを照射している数は3となっている。このビーム照射時間はタイムスロットによって決定されており、セルに割り当てられたタイムスロットが多いほどビームの照射時間も長くなる。時間的にビームを照射するセルを変更していくことによって、最終的には全てのセルにビームを照射し、通信環境を提供する。このとき、同時に全てのセルにビームを照射するわけではないので必要な増幅器数は同時に照射するビーム数となる。このように、ビームホッピングではカバー範囲を変えることなく衛星に搭載する増幅器を削減している。また、セルごとに割り当てるタイムスロット数を変えることによって地理的に偏りのあるトラフィック要求に対しても柔軟に通信リソースであるタイムスロットを割

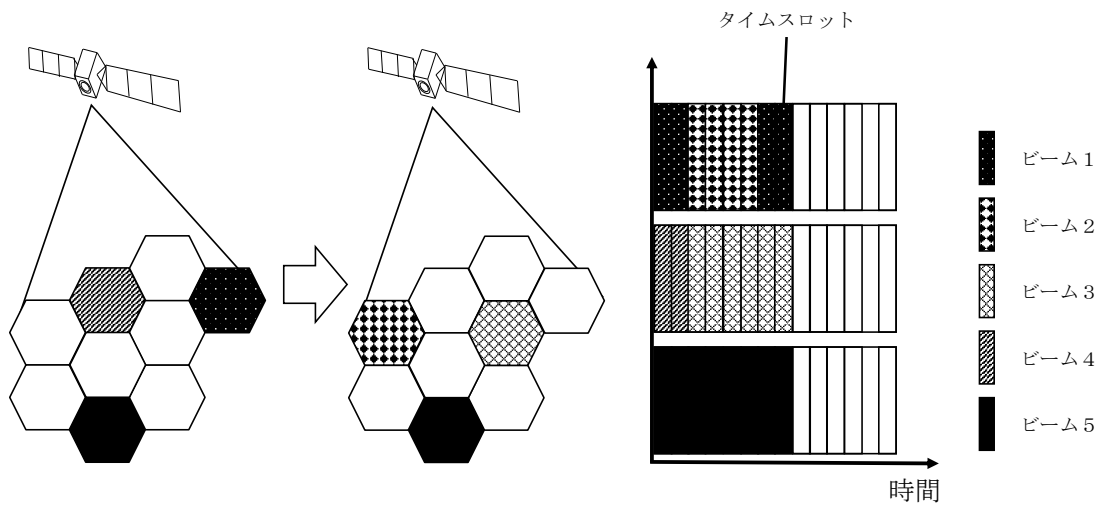


図 2.5: ビームホッピング

当ることが可能となる。

本研究では、このビームホッピングの性質についてもシステム解析モデルによる評価を実施する。

## 2.4 関連研究

本節ではデジタルチャネライザとビームホッピングについて実施されている先行研究について述べる。衛星通信システムの通信リソース割当に関する研究は数多く存在しているが、その多くは衛星通信システムが理想的な柔軟性を有していると仮定した場合におけるリソース割当アルゴリズムの研究である。このような研究では衛星通信システムを構成する機器の制約について検討していないため、実現性に乏しいものとなっている。そのため、本研究では衛星通信システムを構成する機器を明確にし、その性質をモデル化することでより現実的な検討を行っている。また、従来研究では一状態に限定した評価のみを行っているため、シス

システムへの要求が変化した場合どの程度の性能を発揮できるかについては示すまでには至っていなかった。ビームホッピングについてリソース割当手法の検討は行われているが、有効性評価に関しては状態が限定されており、システムへの要求が変化する中での総合的な評価を行うことはできていない。そのため、状態変化を含めた柔軟性解析が可能な評価方法が必要とされている。



## 2.5 まとめ

本章では、衛星通信システムの柔軟性としてデジタルチャネライザとビームホッピングという二つの技術について紹介した。また、デジタルチャネライザの持つ利点やビームホッピングの性質についてまとめた。さらに、この二つの技術に対する既存研究の問題点について言及した。次章では、本章で紹介した二つの技術のうちデジタルチャネライザに注目し、通信のモデル化を行い、柔軟性評価を実施する。

## 第3章

# 衛星通信システムのモデル化と柔軟性 評価

### 3.1 はじめに

前章では，衛星通信システムの柔軟性に関する説明を行った．加えて既存研究においては状態を限定した評価のみを実施しており，状態変化の中で定量的に通信システムの柔軟性解析が必要であることを述べた．本章では，デジタルチャネライザの有効性を評価するためにデジタルチャネライザ搭載衛星について通信のモデル化を行い，柔軟性評価を行う．

### 3.2 想定する衛星通信システム

本節では、デジタルチャネライザの柔軟性評価を行うために想定する衛星通信システムについてまとめる。想定する衛星通信システムの全体像を図3.1に示す。本研究では衛星ゲートウェイから各地球局へのリンクであるフォワードリンクについて国際的に承認されたデジタルテレビ放送のための公開標準規格である DVB-S2 (Digital Video Broadcasting - Satellite-Second Generation) を想定する。また、

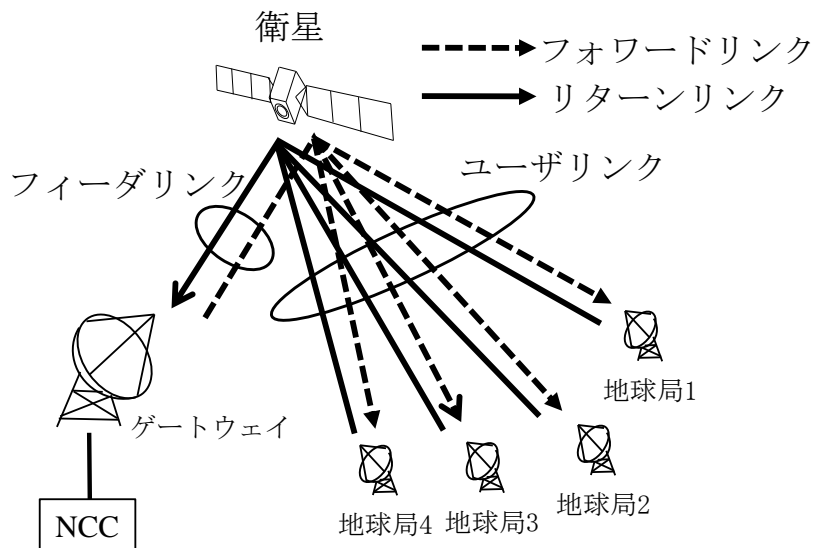


図 3.1: 衛星通信システムの全体像

地球局からゲートウェイへのリターンリンクについては DVB-RCS (Digital Video Broadcasting-Return Channel via Satellite) を想定する。ゲートウェイには NCC (Network Control Center) が接続されており、地球局は通信に必要な通信リソース量を一定時間毎に NCC に送信する。NCC は受信したリソース要求情報を基に各ビームへの通信リソースの配分を決定し、各地球局は指定されたりソースを使用して通信を行う [31]。DVB-RCS では多元接続方式として MF-TDMA (Multi

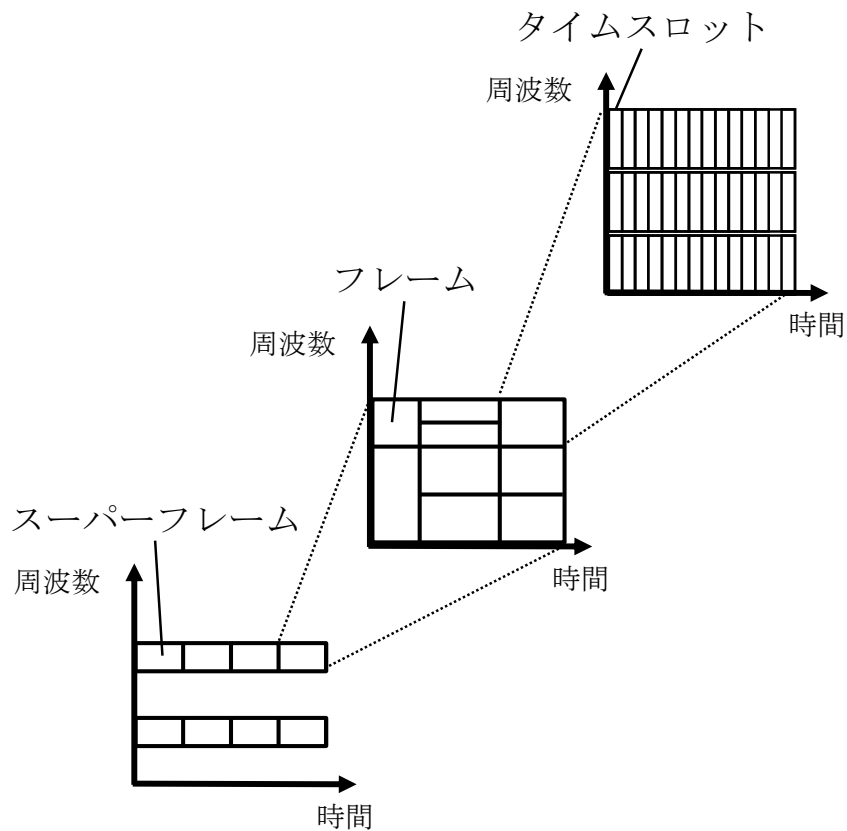


図 3.2: 衛星通信システムのフレーム構造

Frequency-Time Division Multiple Access) を採用している [32]. MF-TDMA では周波数を一定間隔に区切りチャンネルとして利用し，時間についても一定間隔に区切りタイムスロットとして利用する．チャンネルとタイムスロットが衛星通信システムにおける通信リソースとして各地球局に配分される．通信リソースの時間的な区切りに関しては更にタイムスロットが複数個のフレームを構成し，複数のフレームでスーパーフレームを構成している．衛星通信システムの通信リソースの構成を図 3.2 に示す．

各地球局はスーパーフレームごとに NCC に必要リソース量を送信する．また，本研究ではマルチビーム衛星を想定するが，マルチビーム衛星とは複数のビーム

を用いて通信環境を提供する衛星通信システムのことである。マルチビーム衛星では隣接ビームには異なる周波数を割当て、干渉の影響のない離れたビームには同一の周波数帯域を割当てることで同一の周波数帯域を繰り返し利用することによって周波数利用効率の向上を図っている。本研究で想定する衛星通信システムでは円偏波を使用するので、同一周波数帯であっても右旋円偏波と左旋円偏波の2つを同時に使用することが可能である。想定する衛星通信システムの周波数配置を図3.3に示す。衛星通信システムでは割当てられた周波数帯域をフィーダリンク

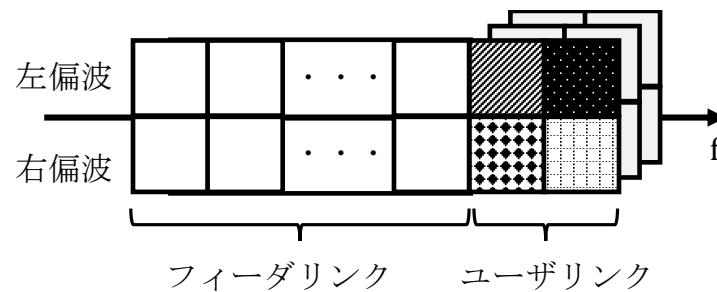


図 3.3: 衛星通信システムの周波数配置

リンクとユーザリンクに配分する。図3.3では上部が左偏波を表しており、下部が右偏波を表している。フィーダリンクはゲートウェイと衛星を結ぶリンクであるため、ゲートウェイが複数ある場合でなければ同一周波数を繰り返し使用することはできない。一方、ユーザリンクは複数ビームに対して周波数を割当てるため同一周波数の繰り返し利用が可能である。ただし隣接ビームで同一周波数帯域を割り当ててしまうとビーム間で干渉が発生するため、隣り合うビームでは異なる周波数を割当てる必要がある。隣り合うビームで同一周波数を使用しないためには四色定理で知られるように最低4つの周波数パターンを用意することが必要となる。本研究では、円偏波を利用するため二つの周波数帯域を用意すれば図3.3の

示すように4つの周波数パターンを用意することができる。ユーザリンクではこの4つの周波数パターンを繰り返し利用する。

### 3.3 衛星通信システムのモデル化

本節では、デジタルチャネライザの柔軟性評価を行うためにチャネライザ搭載衛星とベントパイプ衛星の通信のモデル化を行う。モデル化を行う衛星通信システムの概要図を図3.4に示す。想定する衛星通信システムは $m$ ビームを有するマ

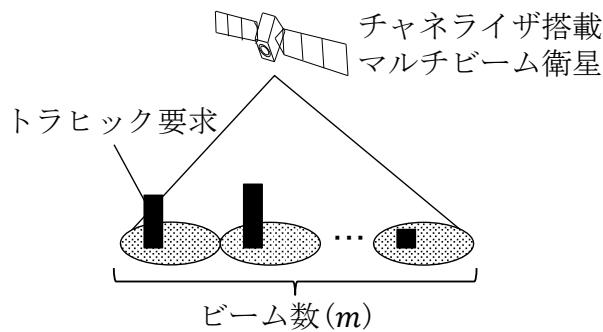


図 3.4: 衛星通信システムモデル

ルチビーム衛星とする。本研究では特定のビームに着目し、そのビームにおいて発生するトラフィックについてモデル化を行う。着目したビームについて宛先ビームごとの要求チャンネル数と割当チャンネル数の関係を図3.5に示す。なお、今回着目しているビーム番号を $i$ とし、トラフィックの宛先ビーム番号を $j$ で表す。また、ビーム $i$ からビーム $j$ へのトラフィックに割り当てるチャンネル数を $n_{ij}$ とし、この $n_{ij}$ の決定の仕方についてモデル化を行う。1チャンネルの周波数帯域幅を $bw$ とするとビーム $i$ に割当てられている周波数帯域幅 $BW_i$ は以下の式で表すことがで

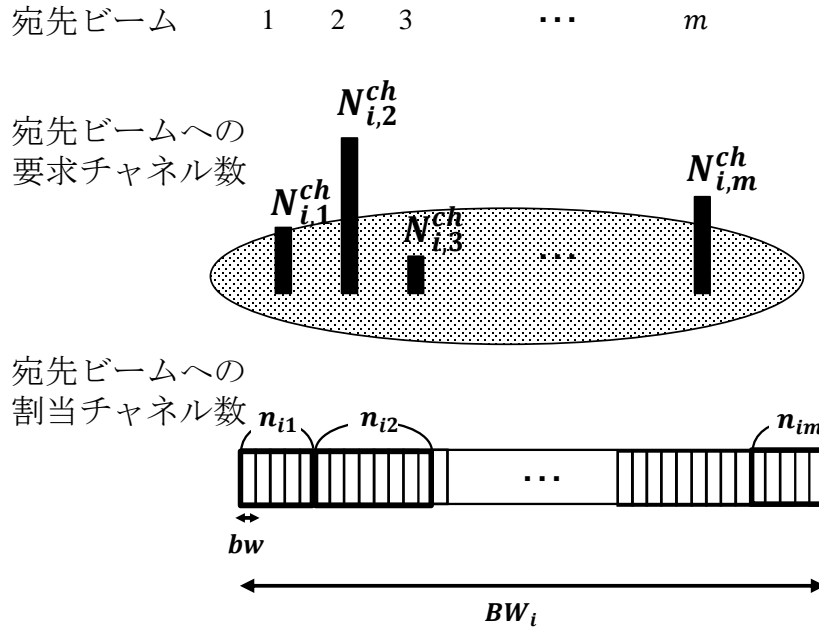


図 3.5: 着目しているビームでのチャンネル割当

きる。

$$BW_i = bw \cdot \left( \sum_{j=1}^m n_{ij} \right). \quad (3.1)$$

このとき、1チャンネルで伝送可能なチャンネル容量  $C_{ch}$  はシャノン・ハートレーの定理を用いて以下の式で表すことができる。

$$C_{ch} = bw \log_2(1 + S/N). \quad (3.2)$$

$S/N$  は信号対雑音比を表しており、所望の信号に対しての雑音の強度がどの程度あるかを表している。実際の衛星通信システムでは通信する端末のビーム内での位置や周囲の通信環境、降雨の状況によっても  $S/N$  の大きさは変わるが本研究では解析を簡略化するため、全チャンネルにおいて同一の  $S/N$  を使用する。スーパーフレームの通信容量  $C_{sf}$  は、1スーパーフレームの長さを  $t_{sf}$  と定めることによ

り，以下のように表すことができる．

$$C_{sf} = C_{ch} \cdot t_{sf}. \quad (3.3)$$

タイムスロット長を  $t_s$  とするとスーパーフレームを構成するタイムスロット数  $N_{sf}$  は

$$N_{sf} = \frac{t_{sf}}{t_s}, \quad (3.4)$$

となる．ビーム  $i$  からビーム  $j$  へのトラヒックの送信に必要なタイムスロット数を  $N_{ij}^{ts}$  とすると，ビーム  $i$  からビーム  $j$  へのトラヒックの送信に必要なチャンネル数  $N_{ij}^{ch}$  は以下の式で与えられる．

$$N_{ij}^{ch} = \left\lceil \frac{N_{ij}^{ts}}{N_{sf}} \right\rceil. \quad (3.5)$$

第2章で述べたように，ベントパイプ衛星では要求チャンネル数  $N_{ij}^{ch}$  に応じて割当てチャンネル数  $n_{ij}$  を変更することはできないが，デジタルチャネライザ搭載衛星であれば柔軟に対応することが可能である．衛星通信システムへの要求がシステムキャパシティを超過した場合，適切な制御を実行しなければトラヒックの損失が発生するが，その損失量は発生しているトラヒック要求や衛星通信システムの柔軟性に依存する．本研究では，チャネライザ搭載衛星とベントパイプ衛星においてどの程度トラヒック損失が発生するかを定式化し，チャネライザ搭載衛星の柔軟性の評価を行う．

### 3.3.1 ベントパイプ型衛星での通信

本項ではベントパイプ型衛星の通信についてモデル化を行う．ベントパイプ衛星では宛先ビームごとに割り当てるチャンネル数  $n_{ij}$  を変えることができないため，



全ての宛先で同数のチャンネルが割り当てられる。ベントパイプ衛星においてある宛先ビームに割り当てられるチャンネル数を  $n$  とすると以下の関係が成り立つ。

$$n_{i1} = n_{i2} = \dots = n_{im} = n. \quad (3.6)$$

このとき、ベントパイプ衛星は全ての宛先に均等にチャンネルを割り当てるため各宛先ビームに割り当てられるチャンネル数  $n$  は以下の式で表すことができる。

$$n = \frac{BW_i}{bw \cdot m}. \quad (3.7)$$

ベントパイプ衛星でのトラヒック損失を定式化するために、トラヒック損失が発生する宛先ビーム群を集合で表す。まず、図3.6に示すように各宛先ビームの要求チャンネル数を降順に並べビーム番号をつけ直す。このとき、要求チャンネル数  $N_{ij}^{\text{ch}}$

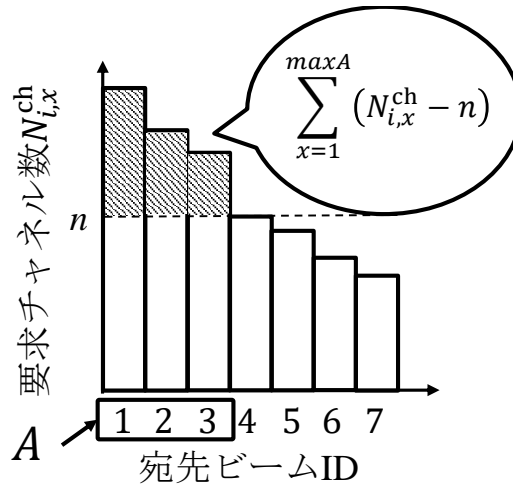


図 3.6: ベントパイプ衛星でのトラヒック損失

が  $n$  を上回る宛先ビームでトラヒック損失が発生する。トラヒック損失が発生する宛先ビーム群を集合  $A$  とすると、 $A$  は以下のように表すことができる。

$$A = \{x | N_{ix}^{\text{ch}} > n, 1 \leq x \leq m, x \in \mathbb{N}\}. \quad (3.8)$$

図中の斜線で示した部分がトラヒック損失となるが、これは要求に対して割当てられたチャンネル数の不足分を表しているため、これに1スーパーフレームでのチャンネル容量を掛けることで1スーパーフレームでのトラヒック損失量  $L_{BP}$  を求めることができる。

$$L_{BP} = \sum_{x=1}^{maxA} (N_{ix}^{ch} - n) \cdot C_{sf}. \quad (3.9)$$

### 3.3.2 チャネライザ搭載衛星での通信

次にチャネライザ搭載衛星でのトラヒック損失の定式化を行う。チャネライザ搭載衛星は宛先ビームごとに割当チャンネル数を変更することができるが、要求チャンネル数がビームの持つチャンネル数を超過した場合、どのようにチャンネルを割当てていくのか定義する必要がある。本研究では全宛先ビームに1チャンネルずつチャンネルを割当てていき、要求を満足した宛先ビームにはそれ以上チャンネルを割当てないという割当て方を想定する [33]。このようにビームが持つ全てのチャンネルを宛先ビームに割当てていくと、ある特定のタイミングでビームの持つチャンネルが枯渇し、それ以上チャンネルを割当てることができなくなる。そのため、宛先ビームは要求チャンネル数を割当てられるものと割当チャンネル数が不足するものに分けることができる。全宛先ビームにチャンネルを割り当て終わった状態を図3.7に示す。

チャネライザ搭載衛星でもベントパイプ衛星と同様にトラヒック損失が発生する宛先ビーム群を集合で表すため、宛先ビームを要求チャンネル数における降順で並び替える。続いて図3.8に示すように宛先ビームを割当てチャンネル数が不足する宛先ビームと要求チャンネル数を満足する宛先ビームとに分別する。図3.8では宛先ビーム番号が1~3のビームが割当チャンネル数が不足している宛先ビーム群

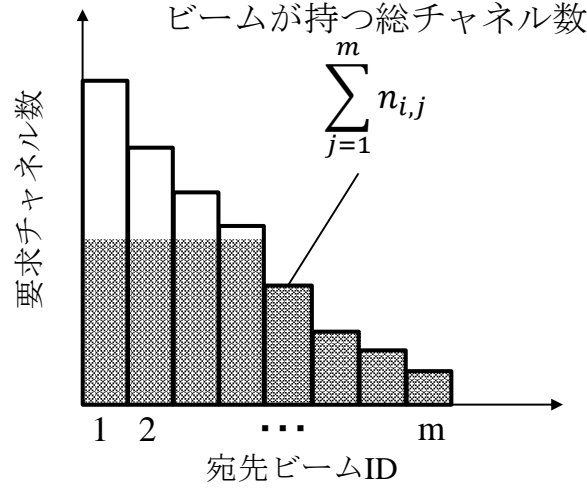


図 3.7: デジタルチャネライザを用いたチャンネル割り当て

であり、4~7のビームが要求チャンネル数を満足する宛先ビーム群である。このとき、以下の条件式を用いて宛先ビーム群を分別する。

$$\sum_{j=0}^{k'} \{(m-j)(N_{i,(m-j)}^{\text{ch}} - N_{i,(m-j+1)}^{\text{ch}})\} \leq \sum_{j=1}^m n_{i,j} \quad (3.10)$$

$$< \sum_{j=0}^{k'+1} \{(m-j)(N_{i,(m-j)}^{\text{ch}} - N_{i,(m-j+1)}^{\text{ch}})\}.$$

ただし、 $N_{m+1} = 0$ とする。想定しているチャンネル割り当て方法では、全宛先ビームに1チャンネルずつ割り当てていくが、式(3.10)は $k'$ 回割り当ててもビームが持つ総チャンネル数が枯渇せず、 $k'+1$ 回目の割り当てでチャンネルが不足するような $k'$ を決定している。このとき、 $k'$ は割り当て回数を示しているため、これを宛先ビーム番号に変換する必要がある。ここで割り当て回数を宛先ビーム番号に変換するため、 $k$ という値を以下のように定義する。1~( $k-1$ )番目の宛先ビームではチャンネルが不足し、 $k$ ~ $m$ 番目の宛先ビームでは要求チャンネル数を満足するチャンネル数が割り当てられる。このとき $k$ と $k'$ の関係は以下の式で表すことがで

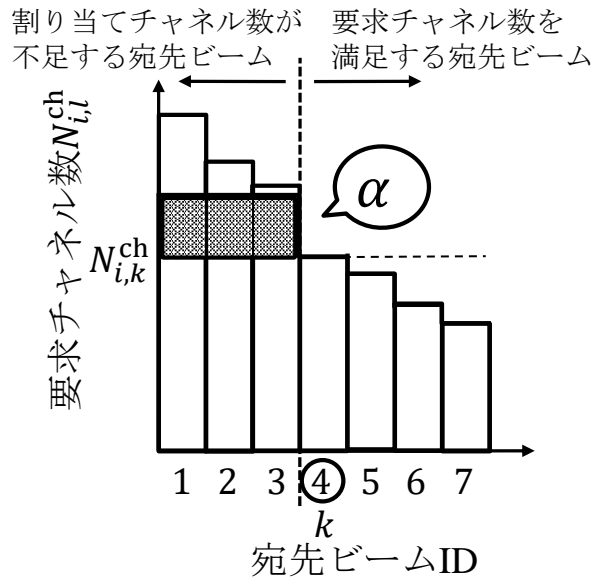


図 3.8: 宛先ビームの分別

きる.

$$k = m - k'. \quad (3.11)$$

式 (3.10), (3.11) を用いることによって, 宛先ビームを割り当てチャンネル数が不足しているものと満足しているものの2種類に分類することができる. 割り当てられるチャンネル数は以下のように表すことができる.

$$n_{ij} = \begin{cases} N_{ik}^{\text{ch}} + \lfloor \frac{\alpha}{k-1} \rfloor & (1 \leq j < k) \\ N_{ij}^{\text{ch}} & (k \leq j \leq m) \end{cases} \quad (3.12)$$

1~(k-1) 番目の宛先ビームでは要求したチャンネル数が割り当てられることはないが, k 番目のビームに割り当てられるチャンネル数と k' 回の割り当てで余ったチャンネルが割り当てられる. ただし, 余ったチャンネルは不足が発生する宛先ビーム数で割る必要がある. k' 回の割り当てで余ったチャンネル数を  $\alpha$  とすると  $\alpha$  は以下

のように表すことができる。

$$\alpha = \sum_{j=1}^m n_{i,j} - \sum_{j=0}^{k'} \{(m-j)(N_{i,(m-j)}^{\text{ch}} - N_{i,(m-j+1)}^{\text{ch}})\}. \quad (3.13)$$

図3.9に、チャネライザ搭載衛星でのトラヒック損失を示す。ベントパイプ衛星

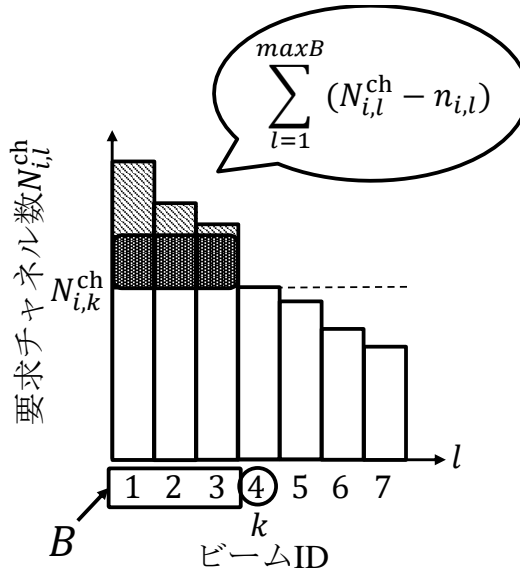


図 3.9: チャネライザ搭載衛星でのトラヒック損失

と同様にトラヒック損失が発生する宛先ビーム群を集合  $B$  として表す。集合  $B$  は  $k$  を用いて以下のように表すことができる。

$$B = \{l | 1 \leq l < k, l \in \mathbb{N}\}. \quad (3.14)$$

チャネライザ搭載衛星の場合もベントパイプ衛星の場合と同様に 1 スーパーフレームでの容量を掛けることでトラヒック損失量  $L_{\text{DC}}$  が以下のように求めることができる。

$$L_{\text{DC}} = \sum_{l=1}^{\max B} (N_{i,l}^{\text{ch}} - n_{i,l}) \cdot C_{sf}. \quad (3.15)$$

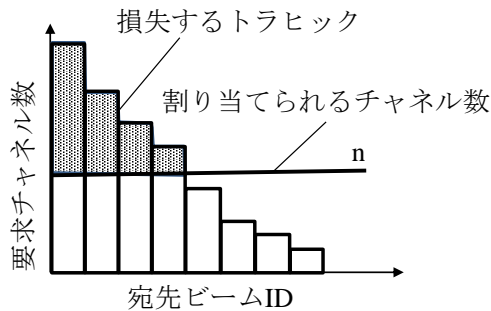


図 3.10:  $L_{BP}$  (分散大)

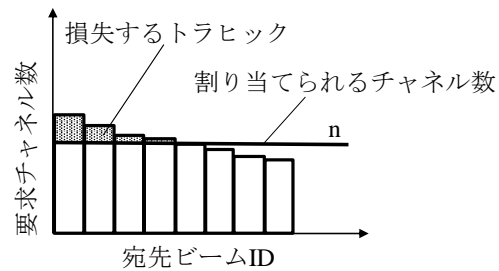


図 3.11:  $L_{BP}$  (分散小)

以上より、ベントパイプ衛星とチャネライザ搭載衛星についてそれぞれトラヒック損失量を定式化することができた。

次に衛星通信システムの柔軟性に影響を及ぼす要素について検討を行う。図3.10に示すように宛先ビームごとの要求チャネル数の分散が大きい場合は宛先ビームの要求チャネル数とベントパイプ衛星が固定的に割当てているチャネル数との乖離が大きくなるため、トラヒック損失が大きくなることが予想される。このような場合、要求チャネル数が少ない宛先ビームに対して過剰にチャネルを割当てることになってしまう。図3.11に示すように宛先ビームごとの要求チャネル数の分散が小さい場合は宛先ビームの要求チャネル数がベントパイプ衛星によって割当てられているチャネル数に近づくため、トラヒック損失は小さくなる。一方、チャネライザ搭載衛星の場合は図3.12, 3.13から明らかなように要求チャネル数によって割当てられるチャネル数を変えることができるので分散に関わらず損失するトラヒック量は一定となる。このように、チャネライザ搭載衛星は宛先ビームごとのトラヒック要求量の分散によってその有効性が変化することが予想される。そのため、次節ではチャネライザ搭載衛星の柔軟性を評価するため、要求チャネル数の分散とトラヒック損失の関係について明らかにする。

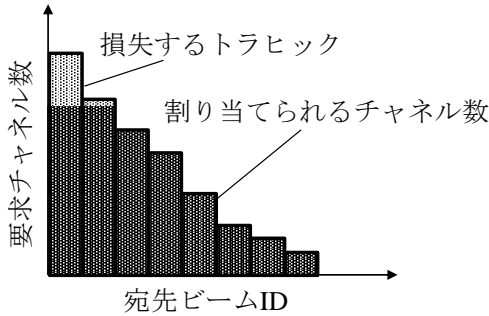


図 3.12:  $L_{DC}$  (分散大)

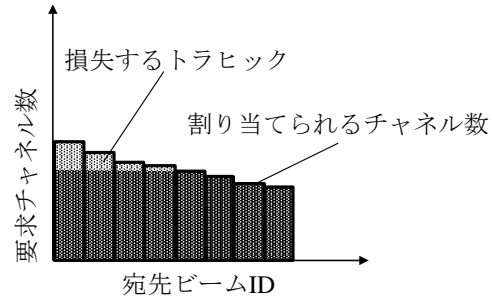


図 3.13:  $L_{DC}$  (分散小)

### 3.4 性能評価

本節ではチャネライザ搭載衛星の柔軟性を評価するため、要求チャネル数がトラヒック損失に与える影響についてベントパイプ衛星とチャネライザ搭載衛星のそれぞれに対して解析を行う。本解析では、各宛先への要求チャネル数は式 (3.16) で表されるガウス分布に従うものとした。

$$f(N_{ij}^{\text{ch}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{(N_{ij}^{\text{ch}} - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot (N_{ij}^{\text{ch}} \in \mathbb{N}) \quad (3.16)$$

ガウス分布の標準偏差を変化させることで要求チャネル数の分散による衛星通信システムの柔軟性への影響を評価する。本解析では、標準偏差を 0.5 から 10 まで 0.5 ずつ変化させた。また、総要求チャネル数の影響についても評価するために、要求チャネル数の平均が 10 の場合と 15 の場合の二つのケースについて評価を行った。本解析で用いたパラメータ一覧を表 3.1 にまとめる。

要求チャネル数の平均値が 10 の場合の結果を図 3.14 に示す。標準偏差が小さい場合、つまり分散が小さい場合はベントパイプ衛星についてもチャネライザ搭載衛星についてもトラヒック損失は発生していない。今回はベントパイプ衛星が各宛先に割り当てるチャネル数を 15 としているため、要求チャネル数が 15 を超過

表 3.1: トラヒック損失の解析におけるパラメータ一覧

ビーム数 ( $m$ )	10
チャンネルの周波数帯域幅 ( $bw$ ) [MHz]	1.6
ビーム $i$ に割当てられた周波数帯域幅 ( $BW_i$ ) [MHz]	250
タイムスロット長 ( $t_s$ ) [ms]	2
スーパーフレーム長 ( $t_{sf}$ ) [ms]	640
ベントパイプ衛星によって割当てられるチャンネル数 ( $n$ )	15
$S/N$ 比 [dB]	6
要求チャンネル数の平均 ( $\mu$ )	10, 15
要求チャンネル数の標準偏差 ( $\sigma$ )	0.5 - 10

しない限りトラヒック損失は発生しない。標準偏差が小さい場合、要求チャンネル数は平均値に近い値が発生するため今回のケースでは10に近い値が発生する。その場合、15を超過していないため、ベントパイプ衛星においてもトラヒック損失が発生していない。しかし、標準偏差が大きくなるに従ってベントパイプ衛星では徐々にトラヒック損失が大きくなる。一方、チャネライザ搭載衛星ではほとんどトラヒック損失が発生していない。標準偏差が大きくなると要求チャンネル数の平均からの乖離が大きくなるため、15より大きい値が発生することがある。そのような場合ベントパイプ衛星ではトラヒック損失が発生してしまう。チャネライザ搭載衛星では15より大きい値が発生した場合であっても、要求チャンネル数が15以下の宛先ビームに割当ててるチャンネル数を少なくすることでトラヒック損失が



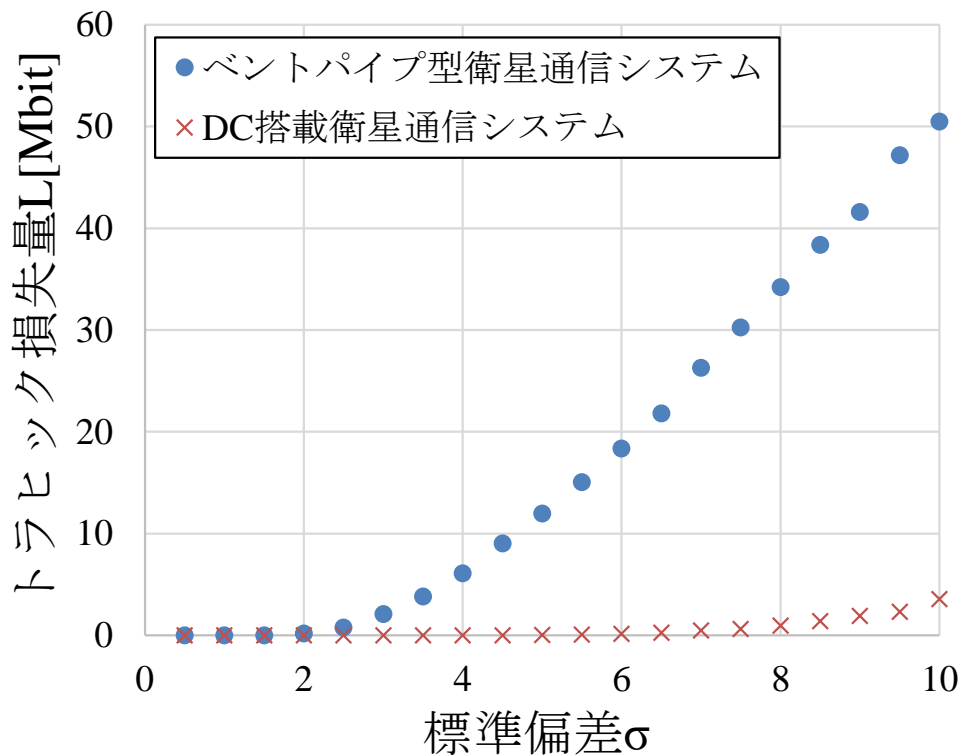


図 3.14: 要求チャンネル数の平均が10の場合

発生しないように調整を行っているため、トラフィック損失が小さい値となっている。次に、要求チャンネル数の平均値が15の場合の結果を図3.15に示す。平均が15の場合では、標準偏差が小さい場合でもトラフィック損失が発生している。前述の通りベントパイプ衛星では各宛先ビームに15のチャンネルを割当てており、今回のケースでは平均が15なので少しでも平均からずれた値が発生するとトラフィック損失につながってしまう。そのため、標準偏差が小さい場合でもトラフィック損失が発生している。チャネライザ搭載衛星においてもトラフィック損失が発生しているがその量はベントパイプ衛星と比較すると小さい値に抑えられている。理論的にはチャネライザ搭載衛星は分散の影響を受けないのにも関わらず、図3.14、

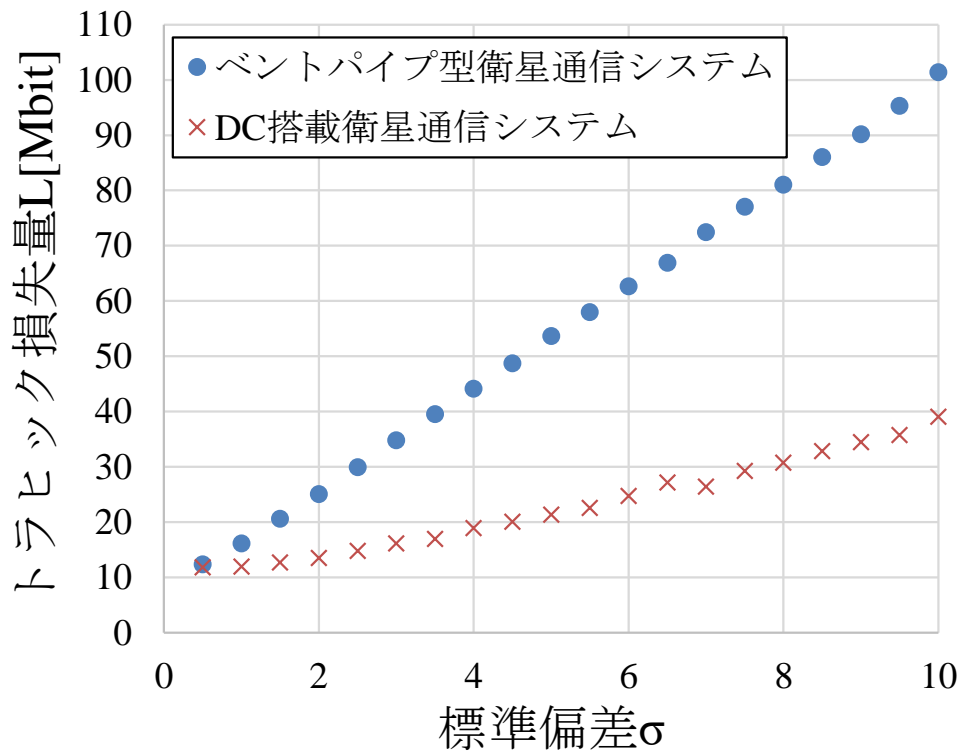


図 3.15: 要求チャンネル数の平均が15の場合

3.15では標準偏差が大きくなるにつれてチャネライザ搭載衛星でのトラヒック損失も大きくなっている。以降ではこの原因について考察を行う。本解析では、各宛先ビームごとの要求チャンネル数をガウス分布に従って発生させているが、ガウス分布では負の値が発生することもあり得る。今回は要求チャンネル数として負の値が発生した場合、0として解析を行っている。その際、あくまでガウス分布の平均は負の値まで考慮した平均として設定されているので、負の値を0として取り扱った場合は平均値が設定値より大きくなってしまふ。そのため、標準偏差が大きくなることで要求チャンネル数として平均から離れた値が出やすくなり、負の値が多く発生し、結果的に総要求チャンネル数が大きくなってしまふためチャネラ

イザ搭載衛星においてもトラヒック損失が発生してしまっている。

以上より、チャネライザ搭載衛星ではベントパイプ衛星と比較して分散の影響を受けにくくトラヒック損失量を低減させることが可能であることを定量的に示すことができた。

### 3.5 まとめ

本章では，チャネライザ搭載衛星の柔軟性を評価するため，チャネライザ搭載衛星とベントパイプ衛星のそれぞれについて通信のモデル化を行った．また，要求チャネル数の分散が衛星通信システムの柔軟性に影響を与えることについて述べ，その影響を解析することで衛星通信システムの柔軟性評価を行った．評価の結果，チャネライザ搭載衛星の柔軟性を定量的に示すことができた．しかし，本章で実施した評価はチャネライザ搭載衛星の柔軟性を定量的評価したという点では有用ではあるが，本研究の目的である状態変化を考慮した総合的な柔軟性評価には至っていないため，更に高度な評価方法の構築が必要である．次章では，そのような評価をすることが可能なシステム解析モデルについて述べる．



## 第4章

# システム解析の基礎モデルの構築

### 4.1 はじめに

本章では，衛星通信システムの柔軟性を状態変化の中で定量評価可能なシステム解析モデルの構築を行う．まず，状態変化の中での柔軟性評価について検討を行い，第3章と同様に衛星通信システムの通信のモデル化を行う．また，状態変化を表す衛星通信システムへの要求の変化の表現方法について検討し，最後に性能評価を実施し，衛星通信システムの柔軟性を評価する．

## 4.2 提案するシステム解析モデル

本節では、状態変化の中で衛星通信システムの柔軟性を定量評価可能なシステム解析モデルについて検討を行う。デジタルチャネライザ等の周波数フレキシビリティ技術は、衛星中継器の帯域幅を実際に使用されている周波数に合わせて可変とすることで、トラフィック変動に対して適応的にリソース割り当ての最適化を可能とし周波数有効利用を図る技術である。そのため、対応可能なトラフィック変動幅が大きいほど、フレキシビリティ性が高いと定義される。そこで、まずはトラフィック変動幅に関係するメトリックによって評価空間を構成することについて検討を行い、図4.1に示すようなシステム解析の基礎モデルを構築した。本解析

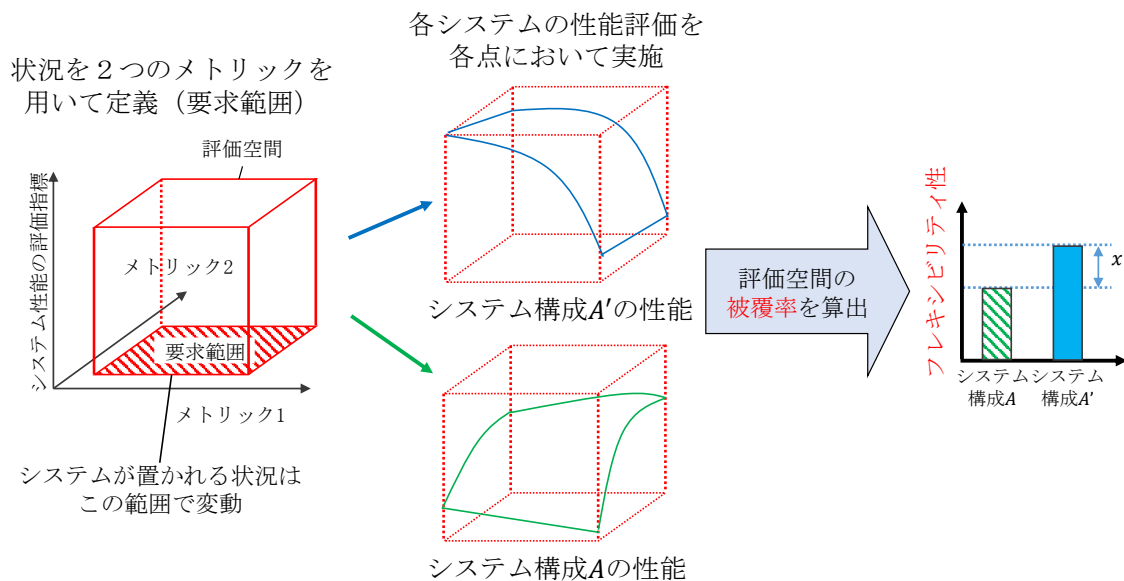


図 4.1: システム解析の基礎モデルの概要図

モデルにおいてはまず、柔軟性評価の対象となるシステムを数理モデルとして表現する。その後、発生し得るシステムへの要求を範囲として指定すると共にシス

システム性能の評価指標を指定することにより評価空間を定義する。本研究では、システムの数理モデル化をシステム定義と呼称し、要求範囲を指定し評価空間を定義することを要求定義と呼称する。そして、評価空間における評価指標を積分することで算出される包含率をシステムのフレキシビリティ性として定義した。このシステム解析モデルを用いることにより、与えられた複数のシステム構成に対して共通の評価空間を適用し、その優劣を判定することが可能となる。図4.1では、システム構成Aとシステム構成A'という二つの通信システムにおける柔軟性評価の例を示している。メトリック1とメトリック2という二つのメトリックによって与えられる要求範囲内の各点においてそれぞれのシステム構成がどの程度の性能を達成することが可能なかをシステム定義によって構築された数理モデルを用いて計算を行う。理想的な柔軟性を有する通信システムでは、要求範囲の全ての点で最大の性能を発揮し、評価空間の上面がシステムの性能ということになる。しかし、実際の通信システムではメトリック1とメトリック2の組み合わせによっては性能が落ち込む場合が想定される。図4.1の例では、システム構成Aはメトリック2が小さい部分で性能が落ち込み、システム構成A'はメトリック1が大きい部分で性能が落ち込んでいる。従来であれば、このようにシステム構成の性能が状態によって変化する場合、それぞれのシステム構成が異なる強みを有しているため優劣をつけることは困難であった。しかし、本研究で定義しているように、評価空間内をどの程度包含することができるかという指標を用いることで、柔軟性という観点からシステム構成の優劣を一意に決定することが可能となる。さらに、その差がどの程度かという点についても定量的に示すことが可能である。図4.1ではシステム構成A'の方がシステム構成Aより $x$ だけフレキシビリティ性が高い状態を示している。



### 4.3 ハイブリッド型中継器

第3章では衛星通信システムの周波数フレキシビリティ技術としてデジタルチャネライザに着目したが，本章でもデジタルチャネライザに着目する．ただし，ハイスループット衛星の総処理帯域は数十GHzに及ぶため全帯域をチャネライザで処理することは困難である．そのため，本章では一部の信号をチャネライザで処理し，残りの信号をベントパイプ中継する図4.2に示すようなハイブリッド型中継器を想定する．また，チャネライザとベントパイプ中継の比率を変化させ，

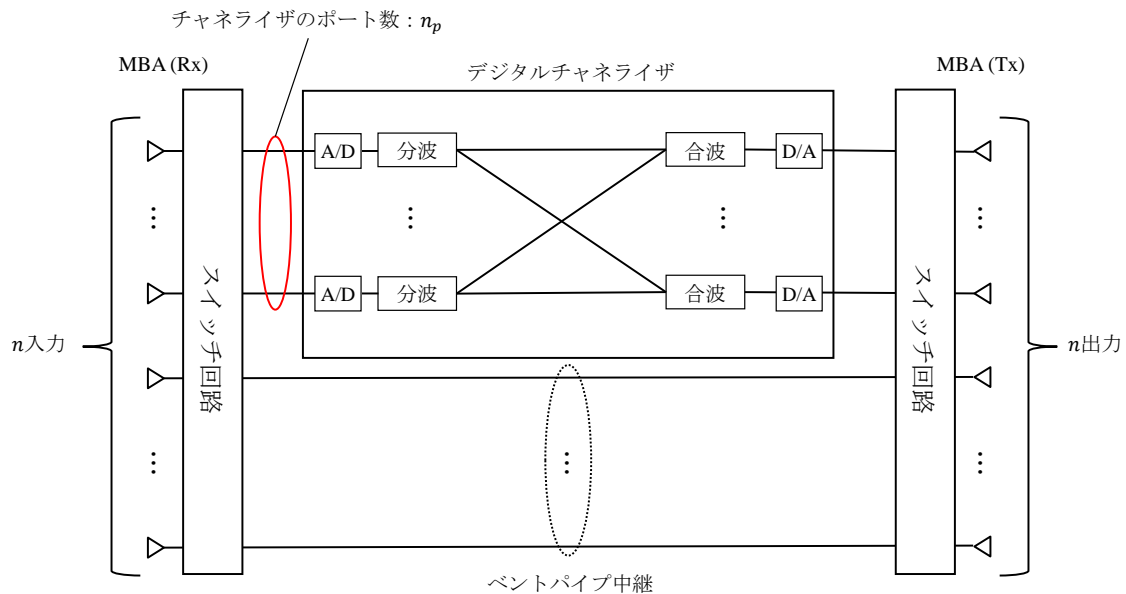


図 4.2: ハイブリッド型中継器

チャネライザの比率がどの程度衛星通信システムの柔軟性に影響を及ぼすのかをシステム解析モデルを用いて検証する．チャネライザは図4.2に示すように，入力された信号を入力ポートを通して処理を行う．本章ではこの入力ポート数の異なるチャネライザを想定することによってチャネライザとベントパイプの比率を

変更させる。チャネライザのポート数が多ければ多い程チャネライザで処理する信号が増加するため、チャネライザの比率が高い衛星通信システムと言える。入力アンテナ数とチャネライザのポート数が等しければ、全ての信号がチャネライザで処理されるということを表している。

#### 4.4 ハイブリッド型中継器搭載衛星の通信のモデル化

本節ではハイブリッド型中継器搭載衛星通信システムのモデル化、つまりシステム定義を行う。ダウンリンクに割り当てられている周波数帯域幅を  $BW_D$  とし、アップリンクの周波数帯域幅を  $BW_U$  とする。始めに、ダウンリンクに着目し、各パラメータの関係を定式化する。フィーダリンク用の周波数帯域幅を  $BW_{FD}$  とし、ユーザリンク用の周波数帯域幅を  $BW_{UD}$  とすると以下の関係が成立する。

$$BW_D = BW_{FD} + BW_{UD}. \quad (4.1)$$

$i$  番目の GW である  $GW_i$  に割り当てられたフィーダリンク用の周波数帯域幅  $BW_{FD}^i$  は  $BW_{FD}$  を用いて以下の式で表すことができる。

$$\sum_{i=1}^{n_g} BW_{FD}^i = 2 \cdot BW_{FD}. \quad (4.2)$$

ここで  $n_g$  とは、GW 数を示している。本章でも衛星通信システムは偏波を使用することを想定しているため、図 4.3 に示すようにフィーダリンク用に割り当てられた周波数帯域幅の 2 倍の周波数を使用することが可能である。ビーム  $i$  に割り当てられたユーザリンク用の周波数帯域幅を  $BW_{UD}^i$  とすると、 $BW_{UD}^i$  は以下のように表現できる。

$$\sum_{i=1}^{n_b} BW_{UD}^i = 2 \cdot BW_{UD} \cdot \left( \frac{n_b}{n_r} \right). \quad (4.3)$$

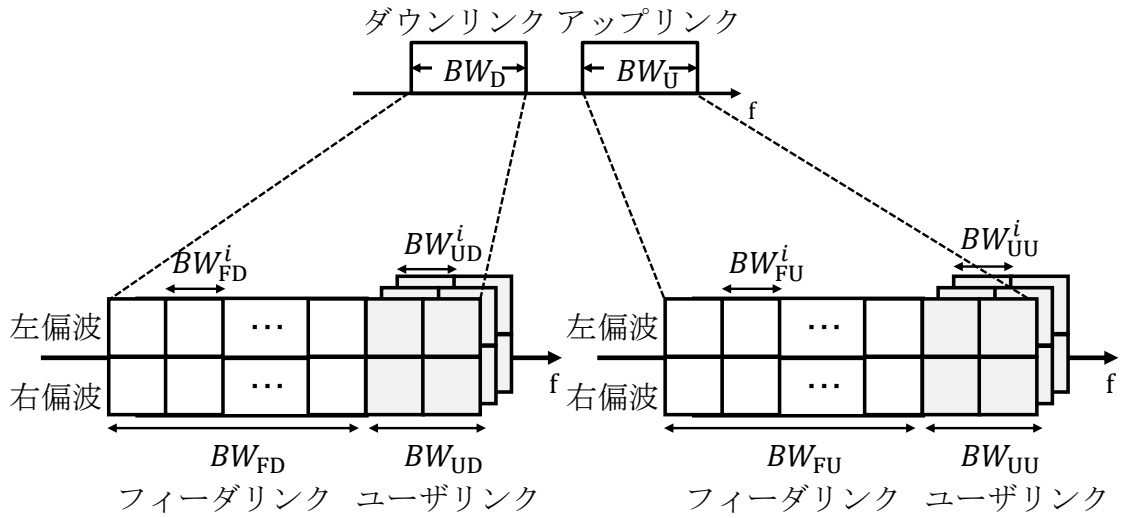


図 4.3: 周波数配置

なお、 $n_b$  はビーム数であり、 $n_r$  は周波数繰返し数を表している。第3章で述べたように、想定する衛星通信システムでは隣接ビームでの干渉を避けるため4つのビームでひとつのグループを形成する。このとき、グループ数は  $\left(\frac{n_b}{n_r}\right)$  で表すことができる。ユーザリンクが通信リソースとして使用可能なのは、このグループ数に偏波を掛けたものであるため、式(4.3)のような関係が成立する。図4.3は周波数繰返し数が4の場合の例を示している。GW*i*に割当てられたフィーダリンク用チャンネル数を  $CH_{FD}^i$  とすると、 $CH_{FD}^i$  は以下の式で表すことができる。

$$CH_{FD}^i = \frac{BW_{FD}^i}{bw}. \quad (4.4)$$

なお、 $bw$  はサブチャンネルの周波数帯域幅を表している。そして、フィーダリンクの総チャンネル数  $CH_{FD}^{all}$  は以下の式で表すことができる。

$$CH_{FD}^{all} = 2 \cdot \frac{BW_{FD}}{bw}. \quad (4.5)$$

以上がフィーダリンクの周波数帯域及びチャンネルに関する関係式であるが、ユーザリンクに関しても同様に以下の式(4.6)-(4.8)が成り立つ。

$$CH_{UD}^i = \frac{BW_{UD}^i}{bw}. \quad (4.6)$$

$$CH_{UD}^{all} = 2 \cdot \frac{BW_{UD}}{bw} \cdot \left( \frac{n_b}{n_r} \right). \quad (4.7)$$

$$\sum_{i=1}^{n_b} CH_{UD}^i = CH_{UD}^{all}. \quad (4.8)$$

ここで、 $CH_{UD}^i$  はビーム  $i$  に割当てられたユーザリンク用チャンネルであり、 $CH_{UD}^{all}$  はユーザリンクの総チャンネル数を表している。アップリンクに関してもダウンリンクと同様の関係となるためアップリンクの記述に関しては省略する。続いてチャネライザに入力される信号とベントパイプ中継される信号の関係について定式化を行う。デジタルチャネライザに入力されるユーザリンク数を  $n_{uc}$ 、ベントパイプ中継されるユーザリンク数を  $n_{ub}$  とすると以下の関係が成り立つ。

$$n_b = n_{uc} + n_{ub}. \quad (4.9)$$

フィーダリンクに関してもデジタルチャネライザに入力されるフィーダリンク数を  $n_{fc}$ 、ベントパイプ中継されるフィーダリンク数を  $n_{fb}$  とすると以下の関係が成り立つ。

$$n_g = n_{fc} + n_{fb}. \quad (4.10)$$

このとき、チャネライザに入力される信号の数がチャネライザのポート数と等しくなるため、以下の式が成り立つ。

$$n_p = n_{uc} + n_{fc}. \quad (4.11)$$

次に、割り当てチャンネル数に関する定式化を行う。想定している衛星通信システムでは図4.4に示すように、リンクに割り当てられたサブチャンネルを各宛先別に分配するため、割り当てサブチャンネル数を表すパラメータでは送信元と宛先を指定する必要がある。ビーム  $i$  からビーム  $j$  へのトラヒックに割り当てるチャンネル

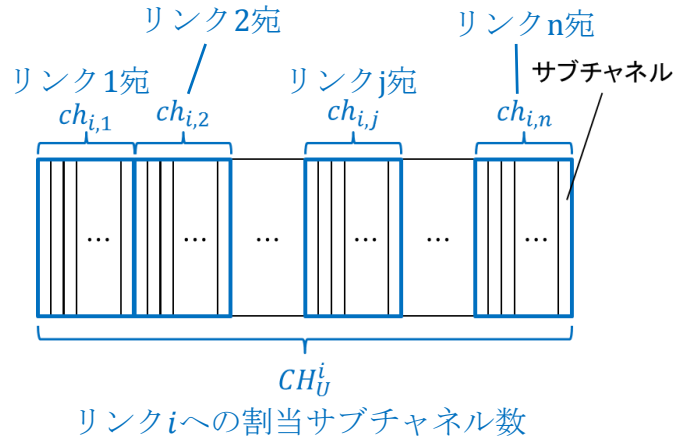


図 4.4: 各宛先ビームへのチャンネル割り当て

数を  $ch_{ij}^{uu}$  とし、行列  $C_{UU}$  として以下のように表す。

$$C_{UU} = \begin{pmatrix} ch_{1,1}^{uu} & ch_{1,2}^{uu} & \dots & ch_{1,n_b}^{uu} \\ ch_{2,1}^{uu} & ch_{2,2}^{uu} & \dots & ch_{2,n_b}^{uu} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ ch_{n_{uc},1}^{uu} & ch_{n_{uc},2}^{uu} & \dots & ch_{n_{uc},n_b}^{uu} \\ ch_{n_{uc}+1,1}^{uu} & ch_{n_{uc}+1,2}^{uu} & \dots & ch_{n_{uc}+1,n_b}^{uu} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ ch_{n_{uc}+n_{ub},1}^{uu} & ch_{n_{uc}+n_{ub},2}^{uu} & \dots & ch_{n_{uc}+n_{ub},n_b}^{uu} \end{pmatrix}. \quad (4.12)$$

式(4.12)の行は送信元ビームを示し、列は宛先ビームを示している。第3章では送信元ビームをひとつに限定し、宛先ビームに関してのみ検討を行ったが、本章では送信元についても検討を行う。例えば、1行目はビーム1から各宛先ビームもしくはGWへ送信されるトラヒックに割り当てられるチャンネル数を表してお

り，図4.5に示すようにビーム1からのアップリンクと各宛先へのダウンリンクを表している．これに対して，1列目は各送信元ビームもしくはGWからビーム

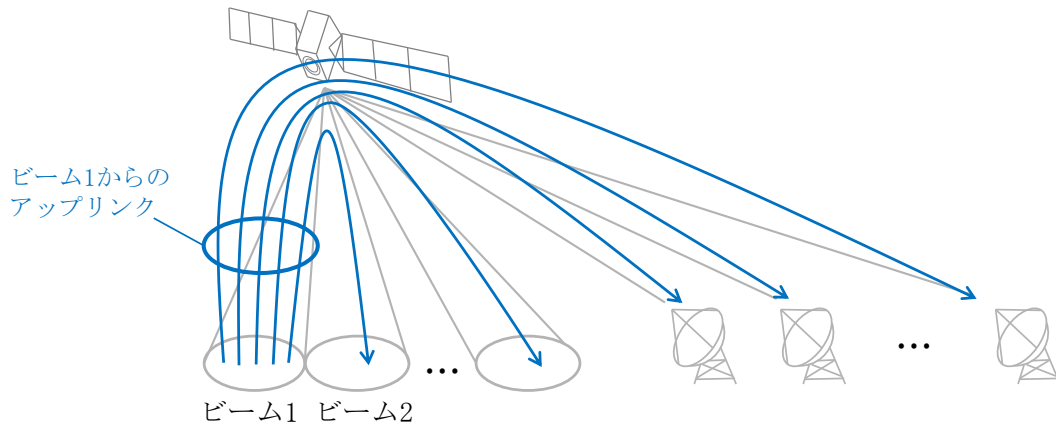


図 4.5: ビーム1からのトラフィックに対して割り当てられるチャンネルのモデル化

1へ送信されるトラフィックに対して割り当てられるチャンネル数を表しており，図4.6に示すように各送信元からのアップリンクとビーム1へのダウンリンクを表している．このとき， $n_{uc}$  がデジタルチャネライザに入力されるユーザリンク数

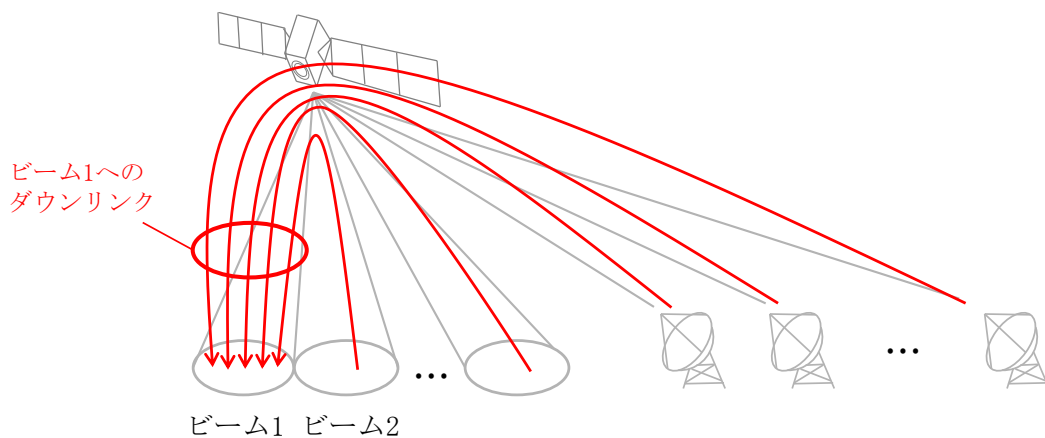


図 4.6: ビーム1へのトラフィックに対して割り当てられるチャンネルのモデル化

なので、1列目から  $n_{uc}$  列目までの行がデジタルチャネライザで処理される信号であり、 $(n_{uc} + 1)$  行目から  $(n_{uc} + n_{ub})$  行目までがベントパイプ中継される信号となる。同様に、ビーム  $i$  から GW  $j$  へのトラヒックに割り当てるチャンネル数  $ch_{ij}^{uf}$  と GW  $i$  からビーム  $j$  へのトラヒックに割り当てるチャンネル数  $ch_{ij}^{fu}$  を行列  $C_{FU}$ ,  $C_{UF}$  とすると以下の式で表現することができる。

$$C_{FU} = \begin{pmatrix} ch_{1,1}^{fu} & ch_{1,2}^{fu} & \dots & ch_{1,n_b}^{fu} \\ ch_{2,1}^{fu} & ch_{2,2}^{fu} & \dots & ch_{2,n_b}^{fu} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ ch_{n_{fc},1}^{fu} & ch_{n_{fc},2}^{fu} & \dots & ch_{n_{fc},n_b}^{fu} \\ ch_{n_{fc}+1,1}^{fu} & ch_{n_{fc}+1,2}^{fu} & \dots & ch_{n_{fc}+1,n_b}^{fu} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ ch_{n_{fc}+n_{fb},1}^{fu} & ch_{n_{fc}+n_{fb},2}^{fu} & \dots & ch_{n_{fc}+n_{fb},n_b}^{fu} \end{pmatrix}. \quad (4.13)$$

$$C_{UF} = \begin{pmatrix} ch_{1,1}^{uf} & ch_{1,2}^{uf} & \dots & ch_{1,n_g}^{uf} \\ ch_{2,1}^{uf} & ch_{2,2}^{uf} & \dots & ch_{2,n_g}^{uf} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ ch_{n_{uc},1}^{uf} & ch_{n_{uc},2}^{uf} & \dots & ch_{n_{uc},n_g}^{uf} \\ ch_{n_{uc}+1,1}^{uf} & ch_{n_{uc}+1,2}^{uf} & \dots & ch_{n_{uc}+1,n_g}^{uf} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ ch_{n_{uc}+n_{ub},1}^{uf} & ch_{n_{uc}+n_{ub},2}^{uf} & \dots & ch_{n_{uc}+n_{ub},n_g}^{uf} \end{pmatrix}. \quad (4.14)$$

最終的に、割り当てチャンネル数は下記の行列  $C$  で表すことができる。

$$C = \begin{pmatrix} C_{UU} & C_{UF} \\ C_{FU} & 0 \end{pmatrix}. \quad (4.15)$$

上記の行列の中に0が含まれるのは、GW から GW へのトラヒックは衛星を介することなく地上網を使用して通信を行うことを想定しているため、衛星でのチャンネル割り当て及びデータ通信を行わないためである。

次に、以上のようにパラメータ定義を行ったチャンネル数がどのような値となるのかについて検討を行う。ベントパイプ中継を行う信号についてはチャンネル割当

数を変更することはできないため、全リンクに同数のチャンネルを割り当てる場合、以下の式で割り当てるチャンネル数を求めることができる。

$$ch_{ij}^{uu} = \min \left( \left\lfloor \frac{CH_{UU}^i}{n_b + n_g} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{CH_{UD}^j}{n_b + n_g} \right\rfloor \right). \quad (4.16)$$

$$(i = n_{uc} + 1, n_{uc} + 2, \dots, n_{uc} + n_{ub}, j = 1, 2, \dots, n_b)$$

$$ch_{ij}^{uf} = \min \left( \left\lfloor \frac{CH_{UU}^i}{n_b + n_g} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{CH_{FD}^j}{n_b} \right\rfloor \right). \quad (4.17)$$

$$(i = n_{uc} + 1, n_{uc} + 2, \dots, n_{uc} + n_{ub}, j = 1, 2, \dots, n_g)$$

$$ch_{ij}^{fu} = \min \left( \left\lfloor \frac{CH_{FU}^i}{n_b} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{CH_{UD}^j}{n_b + n_g} \right\rfloor \right). \quad (4.18)$$

$$(i = n_{fc} + 1, n_{fc} + 2, \dots, n_{fc} + n_{fb}, j = 1, 2, \dots, n_b)$$

一方、デジタルチャネライザに入力される信号は発生しているトラフィックに合わせて割り当てチャンネル数を変更することが可能であるため、チャンネルの割当数の決定には要求量を考慮する必要がある。しかし、本研究で想定している衛星通信システムでは宛先ごとのチャンネル割当数を変更をすることはできても、リンクに割り当てられている周波数帯域幅を変更することはできない。そのため、各宛先に割り当てているチャンネル数の総和には超過することができないという上限が存在する。チャンネル数の上限に関する制約は以下の式で与えられる。

$$\sum_{j=1}^{n_b} ch_{ij}^{uu} + \sum_{j=1}^{n_g} ch_{ij}^{uf} \leq CH_{UU}^i. \quad (i = 1, 2, \dots, n_{uc}) \quad (4.19)$$

$$\sum_{j=1}^{n_b} ch_{ij}^{fu} \leq CH_{FU}^i. \quad (i = 1, 2, \dots, n_{fc}) \quad (4.20)$$

式(4.19)はユーザリンクのアップリンクに関する制約条件である。あるビームから衛星に送信されたトラフィックはチャネライザによって分波され、それぞれの宛



先へと送信される。このとき、あるビームから衛星へのリンクに割り当てられているチャンネル数が式(4.19)の右辺であり、それぞれの宛先へのリンクに割り当てられているチャンネル数の総和が左辺である。そのため、各宛先へのリンクに割り当てられているチャンネル数の総和はあるビームから衛星へのリンクに割り当てられているチャンネル数を超過することはできない。また、式(4.20)はフィーダリンクのアップリンクに関する制約条件である。あるGWから衛星へのリンクに割り当てられているチャンネル数が式(4.20)の右辺であり、それぞれの宛先へのリンクに割り当てられているチャンネルの総和が左辺である。フィーダリンクの場合は、GWからGWへのトラヒックは存在しないため、GWへの割り当てチャンネルを表す項が存在しない。式(4.19)、(4.20)はアップリンクの制約であるが、ダウンリンクに関しても同様に制約条件を考慮する必要がある。式(4.21)、(4.22)にダウンリンクに関する制約条件を記す。

$$\sum_{i=1}^{n_{uc}} ch_{ij}^{uu} + \sum_{i=1}^{n_{fc}} ch_{ij}^{fu} \leq \left( CH_{UD}^j - \left( \sum_{i=n_{uc}+1}^{n_{uc}+n_{ub}} ch_{ij}^{uu} + \sum_{i=n_{fc}+1}^{n_{fc}+n_{fb}} ch_{ij}^{fu} \right) \right). \quad (4.21)$$

$(j = 1, 2, \dots, n_b)$

$$\sum_{i=1}^{n_{uc}} ch_{ij}^{uf} \leq \left( CH_{FD}^j - \sum_{i=n_{uc}+1}^{n_{uc}+n_{ub}} ch_{ij}^{uf} \right). \quad (j = 1, 2, \dots, n_g) \quad (4.22)$$

ダウンリンクには全ての送信元からのトラヒックが合波されるが、そのトラヒックにはチャネライザを経由したものとベントパイプ中継をされたものが混在している。前述の通り、ベントパイプ中継の場合は式(4.16)、(4.17)、(4.18)によって固定的に割り当てチャンネル数が決定されているので、チャネライザを経由した信号で利用可能なチャンネル数はダウンリンクに割り当てられたチャンネル数からベントパイプ用に割り当てられたチャンネル数を引いたものとなる。上記の通り、チャ

ネライザで処理する信号については満たさなければならない制約条件はあるものの、制約条件の中で自由にチャンネルの割り当てを変更することができる。本研究では、要求量に対して実際にチャンネルを割り当てて送信できた量の割合であるトラフィック収容率を目的関数とし、トラフィック収容率を最大化するようなチャンネル割り当てを行う通信システムを想定する。送信元  $i$  から宛先  $j$  への要求チャンネル数を  $d_{ij}$  とし、割り当てチャンネル数と同様に行列  $D$  として定義すると以下の通り表現することができる。

$$D = \begin{pmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} & \cdots & d_{1,n_b} & d_{1,n_b+1} & \cdots & d_{1,n_b+n_g} \\ d_{2,1} & d_{2,2} & \cdots & d_{2,n_b} & d_{2,n_b+1} & \cdots & d_{2,n_b+n_g} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n_b,1} & d_{n_b,2} & \cdots & d_{n_b,n_b} & d_{n_b,n_b+1} & \cdots & d_{n_b,n_b+n_g} \\ d_{n_b+1,1} & d_{n_b+1,2} & \cdots & d_{n_b+1,n_b} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n_b+n_g,1} & d_{n_b+n_g,2} & \cdots & d_{n_b+n_g,n_b} & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}. \quad (4.23)$$

要求チャンネル数についても GW から GW へのトラフィックは0としている。このとき、トラフィック収容率は下記の通り定義することができる。

$$T_{\text{acc}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} \sum_{j=1}^{n_b} ch_{ij}^{\text{uu}} + \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{j=1}^{n_b} ch_{ij}^{\text{fu}} + \sum_{i=1}^{n_b} \sum_{j=1}^{n_g} ch_{ij}^{\text{uf}}}{\sum_{i=1}^{n_b+n_g} \sum_{j=1}^{n_b+n_g} d_{ij}}. \quad (4.24)$$

本研究では第4.2節で定義したシステムの評価指標としてこのトラフィック収容率を使用する。また、前述の通り解析モデルにおいては評価空間をどの程度包含することができるかという指標を用いる。この指標を Flexibility index と呼称し、以下のように定義する。

$$\text{Flexibility index} = \sum_{\mu=\mu_{\min}}^{\mu_{\max}} \sum_{\Delta\mu=\Delta\mu_{\min}}^{\Delta\mu_{\max}} \left( \frac{1}{\Delta\mu_{\max} - \Delta\mu_{\min} + 1} \right) \cdot \left( \frac{1}{\mu_{\max} - \mu_{\min} + 1} \right) \cdot (\max T_{\text{acc}}). \quad (4.25)$$

また、要求量以上にチャンネルを割り当てる必要はないため、要求量以上のチャ

ネル割当を防ぐ制約条件を追加する必要がある。そのような制約条件を式 (4.26)-(4.28) のように表す。

$$ch_{ij}^{un} \leq d_{ij}, \quad (i = 1, 2, \dots, n_{uc} + n_{ub}, j = 1, 2, \dots, n_b) \quad (4.26)$$

$$ch_{ij}^{fu} \leq d_{ij}, \quad (i = 1, 2, \dots, n_{fc} + n_{fb}, j = 1, 2, \dots, n_b) \quad (4.27)$$

$$ch_{ij}^{uf} \leq d_{ij}, \quad (i = 1, 2, \dots, n_{uc} + n_{ub}, j = 1, 2, \dots, n_g) \quad (4.28)$$

チャネライザに入力される信号は，トラヒック収容率を目的関数とし，既に説明を行った制約条件を満たす線形計画法によって割り当てチャネル数を決定するものとする [34]。以上がパラメータの定義と各パラメータの関係に関する検討である。また，想定している衛星通信システムのチャネル割り当て方法についても説明を行いシステム定義を完了した。本節で定義したパラメータ一覧を表 4.1, 4.2 にまとめる。次節では，想定している衛星通信システムに対して発生し得る要求の変化について検討を行う。

## 4.5 ハイブリッド型中継器搭載衛星への要求定義

本節では，発生し得るシステムへの要求を範囲として指定する要求定義について述べる。本研究では要求範囲を指定する二つのメトリックを要求チャネル数の平均  $\mu$  とばらつきの範囲  $\Delta\mu$  で与える。このとき，前節で定義した要求チャネル数  $d_{ij}$  が図 4.7 で示す範囲で発生するものとする。 $d_{ij}$  の最大値は  $\mu + \Delta\mu$  であり，最小値は  $\mu - \Delta\mu$  となる。また，この範囲内での発生確率は一定であるものとした。上記の関係を集合  $\mathbb{D}$  で表現すると以下のように表すことができる。

$$\mathbb{D} = \{d_{ij} | \mu - \Delta\mu \leq d_{ij} \leq \mu + \Delta\mu, d_{ij} \in \mathbb{N}\}. \quad (4.29)$$

表 4.1: ハイブリッド型中継器搭載衛星の通信モデルにおけるパラメータ定義1

ビーム数	$n_b$
ゲートウェイ数	$n_g$
周波数繰り返し数	$n_r$
デジタルチャネライザに入力されるユーザリンク数	$n_{uc}$
ベントパイプ中継されるユーザリンク数	$n_{ub}$
デジタルチャネライザに入力されるフィーダリンク数	$n_{fc}$
ベントパイプ中継されるフィーダリンク数	$n_{fb}$
デジタルチャネライザのポート数	$n_p$
サブチャネルの周波数帯域幅	$bw$
アップリンク用の周波数帯域幅	$BW_U$
フィーダリンク用の周波数帯域幅 (アップリンク)	$BW_{FU}$
ユーザリンク用の周波数帯域幅 (アップリンク)	$BW_{UU}$
GW $i$ に割当てられたフィーダリンク用の周波数帯域幅 (アップリンク)	$BW_{FU}^i$
ビーム $i$ に割当てられたユーザリンク用の周波数帯域幅 (アップリンク)	$BW_{UU}^i$
GW $i$ に割当てられたフィーダリンク用チャンネル数 (アップリンク)	$CH_{FU}^i$
フィーダリンクの総チャンネル数 (アップリンク)	$CH_{FU}^{all}$
ビーム $i$ に割当てられたユーザリンク用チャンネル数 (アップリンク)	$CH_{UU}^i$

表 4.2: ハイブリッド型中継器搭載衛星の通信モデルにおけるパラメータ定義2

ユーザリンクの総チャンネル数(アップリンク)	$CH_{\text{UU}}^{\text{all}}$
ダウンリンク用の周波数帯域幅	$BW_{\text{D}}$
フィーダリンク用の周波数帯域幅(ダウンリンク)	$BW_{\text{FD}}$
ユーザリンク用の周波数帯域幅(ダウンリンク)	$BW_{\text{UD}}$
GW $i$ に割当てられたフィーダリンク用の周波数帯域幅(ダウンリンク)	$BW_{\text{FD}}^i$
ビーム $i$ に割当てられたユーザリンク用の周波数帯域幅(ダウンリンク)	$BW_{\text{UD}}^i$
GW $i$ に割当てられたフィーダリンク用チャンネル数(ダウンリンク)	$CH_{\text{FD}}^i$
フィーダリンクの総チャンネル数(ダウンリンク)	$CH_{\text{FD}}^{\text{all}}$
ビーム $i$ に割当てられたユーザリンク用チャンネル数(ダウンリンク)	$CH_{\text{UD}}^i$
ユーザリンクの総チャンネル数(ダウンリンク)	$CH_{\text{UD}}^{\text{all}}$
ビーム $i$ からビーム $j$ へのトラヒックに割当てるチャンネル数	$ch_{ij}^{\text{uu}}$
ビーム $i$ からGW $j$ へのトラヒックに割当てるチャンネル数	$ch_{ij}^{\text{uf}}$
GW $i$ からビーム $j$ へのトラヒックに割当てるチャンネル数	$ch_{ij}^{\text{fu}}$

次に、要求チャンネル数の平均  $\mu$  とばらつきの範囲  $\Delta\mu$  の変化による要求チャンネル数の発生範囲に対する影響について説明する。要求チャンネル数の平均が小さい場合は図 4.8 のように  $d_{ij}$  存在範囲が所望チャンネル数が小さくなる方向に移動し、要求チャンネル数の平均が大きい場合は図 4.9 に示すように存在範囲が大きくなる方向に移動する。これに対して、ばらつきの範囲が小さい場合は図 4.10 に示すよう

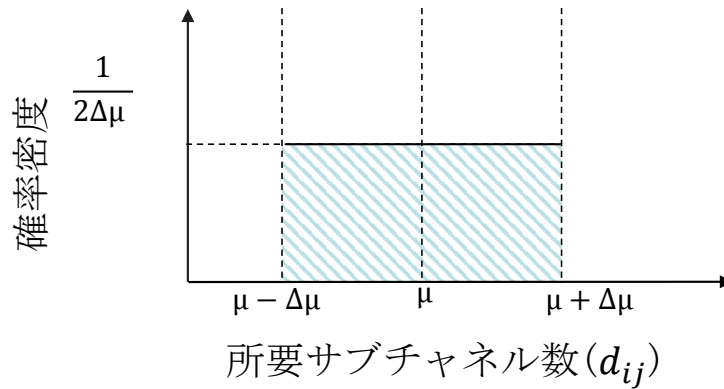


図 4.7: 所望チャネル数の発生分布

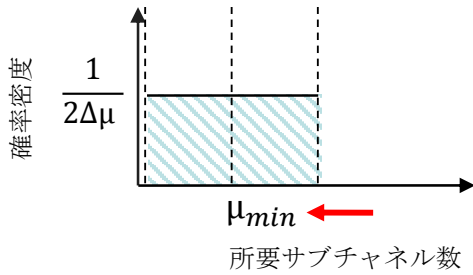


図 4.8:  $d_{ij}$  の存在範囲 (平均小)

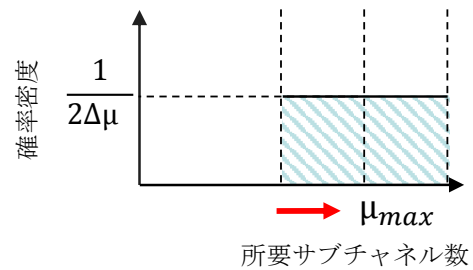


図 4.9:  $d_{ij}$  の存在範囲 (平均大)

に、要求チャネル数が平均から近い値となる確率が高くなる。一方、ばらつきの範囲が大きい場合は図 4.11 に示すように、平均から遠い値となる確率が高くなる。このように二つのメトリックによって定義した要求範囲は図 4.12 のように与えられる。以上で衛星通信システムに対して発生する要求の変化の定義を完了した。次節では、本節で定義した範囲におけるトラヒック収容率を算出し、衛星通信システムの柔軟性解析を実施する。

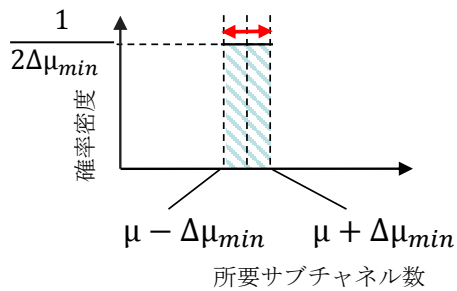


図 4.10:  $d_{ij}$ (ばらつきの範囲小)

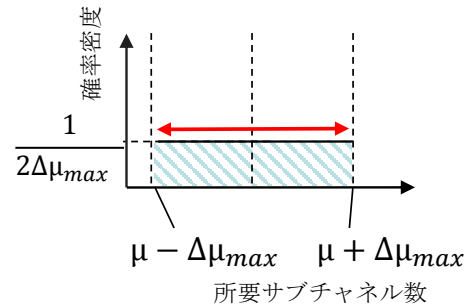


図 4.11:  $d_{ij}$ (ばらつきの範囲大)

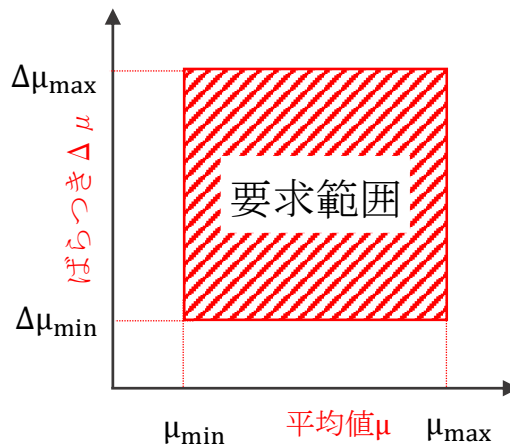


図 4.12: 要求範囲

## 4.6 性能評価

本節では、状態変化の中で衛星通信システムの柔軟性を定量的に評価するため、構築したシステム解析の基礎モデルを用いた柔軟性解析を行う。本解析では、ハイブリッド型中継器を構成するチャネライザのポート数を変化させることでチャネライザとベントパイプの比率を変化させ、チャネライザによる衛星通信システムの柔軟性の向上を評価する。評価軸としては、トラヒック収容率の改善量として全てベントパイプ中継を行った場合と比較したときとのトラヒック収容率の差

を用いた。また、本解析では要求範囲として図 4.13 に示すように、要求チャンネル数の平均は5から15、ばらつきの範囲は1から5という値を用いた。なお、本

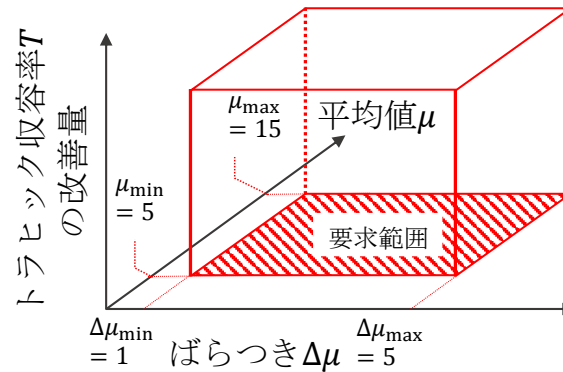


図 4.13: 評価空間

研究では構築したシステム解析の基礎モデルの有効性を検証するために、一例としてこのような要求範囲を用いているが実際に解析モデルを利用する際は、システム運用時に想定される値を代入することで、より実用的な解析が実現される。その他のパラメータ設定に関しては表 4.3 にまとめる。チャネライザのポート数が12の場合の解析結果を図 4.14 に示す。図 4.14 に示すように評価空間における解析は三次元空間で行ったが、説明のため4つのケースを示す。ばらつきの値を固定し、平均の値を変化させた2つのケースと平均の値を固定し、ばらつきの値を変化させた2つのケースである。表 4.4 に示す4つのケースについての評価結果を図 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 に示し、それぞれのケースについて検討を行う。

まずばらつきの値が小さい場合（ばらつき = 1）の結果を図 4.15 に示す。このケースではデジタルチャネライザのポート数が多い程トラヒック収容率の改善量は大きいと見られるが全体的に改善量は小さい。さらに、平均値が7まではトラヒック収容率の改善は一切見られない。平均値が小さくばらつきも小さい場合はベントパイ



表 4.3: ハイブリッド型中継器の柔軟性解析におけるパラメータ設定1

ビーム数 ( $n_b$ )	10
ゲートウェイ数 ( $n_g$ )	2
周波数繰り返し数 ( $n_r$ )	4
サブチャネルの周波数帯域幅 ( $bw$ ) [MHz]	2.5
アップリンク用の周波数帯域幅 ( $BW_U$ ) [MHz]	750
ダウンリンク用の周波数帯域幅 ( $BW_D$ ) [MHz]	750
フィーダリンク用の周波数帯域幅 (アップリンク) ( $BW_{FU}$ ) [MHz]	250
フィーダリンク用の周波数帯域幅 (ダウンリンク) ( $BW_{FD}$ ) [MHz]	250
ユーザリンク用の周波数帯域幅 (アップリンク) ( $BW_{UU}$ ) [MHz]	500
ユーザリンク用の周波数帯域幅 (ダウンリンク) ( $BW_{UD}$ ) [MHz]	500
GW $i$ に割当てられたフィーダリンク用の周波数帯域幅 (アップリンク) ( $BW_{FU}^i$ ) [MHz]	250
ビーム $i$ に割当てられたユーザリンク用の周波数帯域幅 (アップリンク) ( $BW_{UU}^i$ ) [MHz]	250
GW $i$ に割当てられたフィーダリンク用チャンネル (ダウンリンク) ( $BW_{FD}^i$ ) [MHz]	250
ビーム $i$ に割当てられたユーザリンク用チャンネル (ダウンリンク) ( $BW_{UD}^i$ ) [MHz]	250

プ型のシステムであっても要求トラフィックを全て収容可能であるためである。また、平均値が大きくなるにつれてトラフィック収容率の改善量が小さくなっている。トラフィック要求量が大きくなっていくとデジタルチャネライザによって改善した

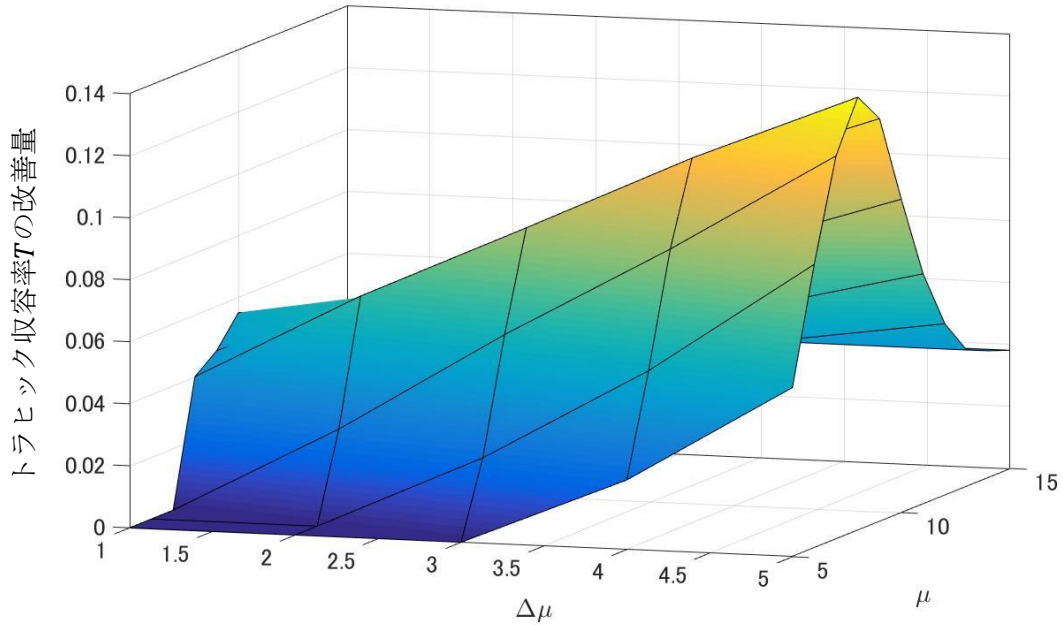


図 4.14: 評価空間におけるトラフィック収容率の改善量

表 4.4: ハイブリッド型中継器の柔軟性解析におけるパラメータ設定2

	Case			
	1	2	3	4
$\mu$	5-15	5-15	8	5
$\Delta\mu$	1	5	1-5	1-5
$n_p$	2,4,6,8,10,12			

収容率と比較して要求しているトラフィックの総量が大きくなってしまったため、トラフィック収容率の改善量は小さくなる。次にばらつきの値が大きい場合（ばらつき=5）での結果を図4.16に示す。ばらつきの値が小さい場合と比較してトラフィック収容率の改善量は大きくなっている。これは、宛先ごとの発生トラフィックの値が大きくばらついた場合であってもデジタルチャネライザの機能によって柔軟に

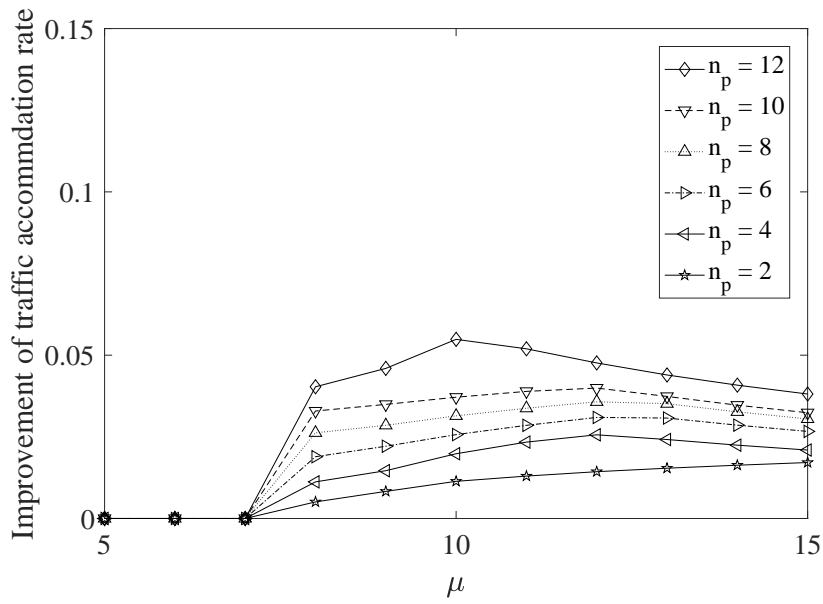


図 4.15: Case1( $\Delta\mu = 1$ )

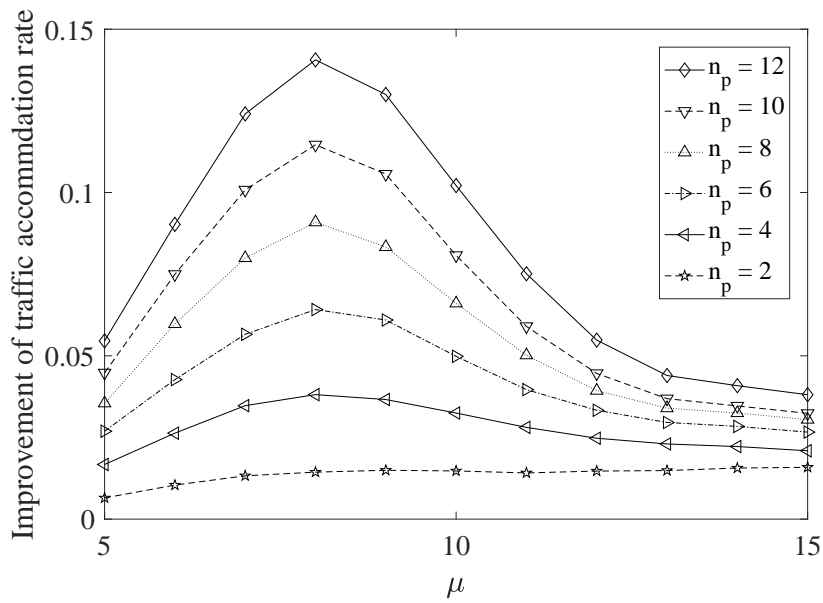


図 4.16: Case2( $\Delta\mu = 5$ )

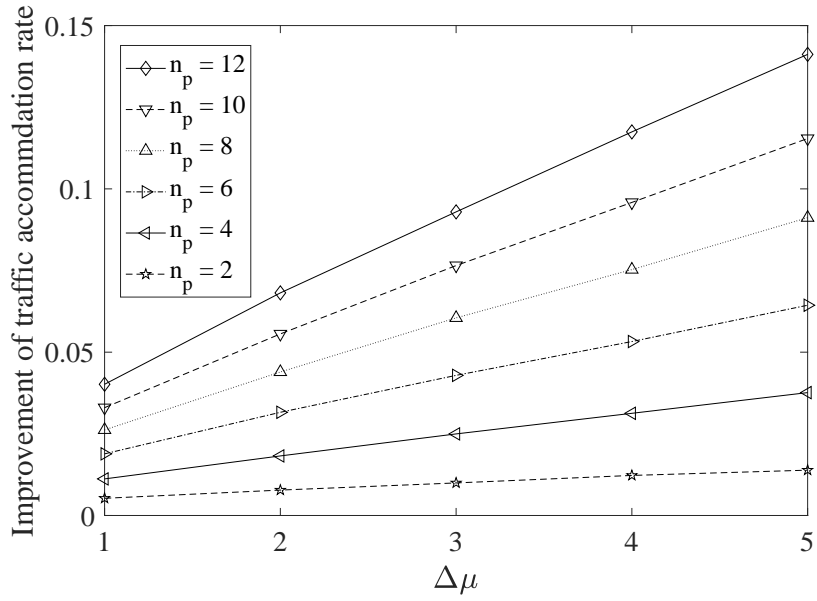


図 4.17: Case3( $\mu = 8$ )

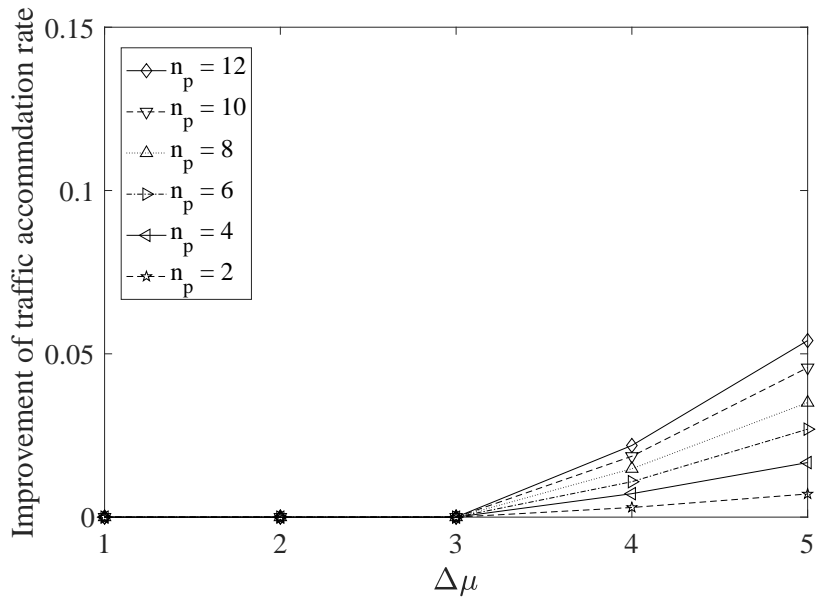


図 4.18: Case4( $\mu = 5$ )

チャンネル割当が行われた結果である。また、デジタルチャネライザのポート数によるトラヒック収容率の改善量もばらつきが小さい場合と比較して大きくなっている。トラヒック収容率の改善量は平均値が8のときに最大となっている。これは平均値が8のときに最もシステムキャパシティに近い総トラヒック要求量となっているためである。この値を越えてしまうとどんなに柔軟性の高いシステムであっても総トラヒック要求量が大きすぎるためトラヒック収容率が小さくなってしまふ。次に、平均値を固定しばらつきの値を変化させたケースについての結果を示す。まず、図4.17に平均値が8の場合を示す。これは、先ほどの考察から最もトラヒック収容率の改善量が大きくなるケースである。チャネライザのポート数との関係を見るとやはりポート数が多くなることでトラヒック収容率の改善量も大きくなっていることがわかる。また、ばらつきの値が大きくなるにつれて改善量も大きくなっていることわかる。最後に、平均値が5のケースを図4.18に示す。平均値が5であり、ばらつきの値も小さい場合はベントパイプ型でも十分にトラヒックを収容可能であるため、改善量は0となる。しかし、ばらつきの値が大きくなると徐々に改善が見られるようになる。ただし、改善量は平均値が8の場合と比較すると小さい。以上4つの解析から要求チャンネル数のばらつきが大きいほどトラヒック収容率の改善量は向上することがわかった。さらに同じばらつきであっても平均値が小さい場合と比較すると大きい場合の方がトラヒック収容率の改善量が大きいということもわかった。これは、要求チャンネル数の総量がシステムキャパシティに近いほどばらつきの影響が大きくなるためであると考えられる。第4.4節で定義した Flexibility index の解析結果を図4.19に示す。チャネライザのポート数が多くなることで Flexibility index の値が向上していることが確認できる。なお、チャネライザのポート数が1の場合はダウンリンクの制約条件によ

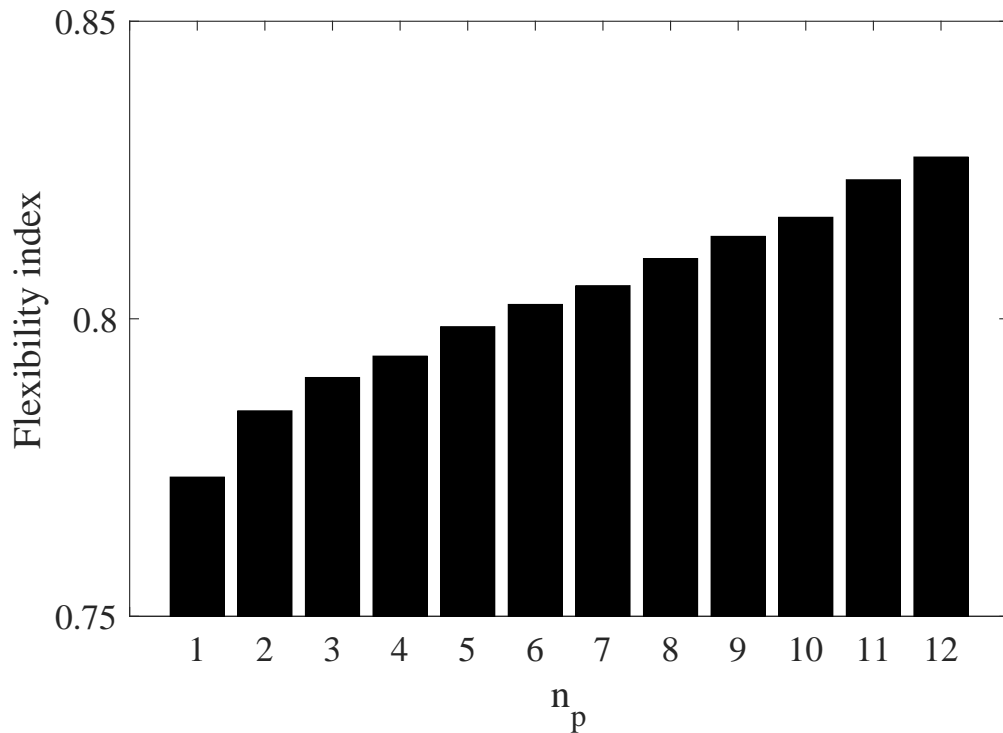


図 4.19: システム構成に対する周波数フレキシビリティ性の定量評価

りベントパイプと同一のシステムとなるためベントパイプ型の結果は省略している。また、本研究では入力アンテナ数（ユーザリンクのビーム数とフィーダリンク数の合計）を12と設定しているため、チャネライザのポート数は12が上限となる。フルチャネライザとベントパイプ型によって約5パーセントの Flexibility index の改善が見られることがわかった。また、以上の結果から、構築したシステム解析の基礎モデルが衛星通信システムの柔軟性を正確に評価可能であることを示した。

## 4.7 まとめ

本章では，システム解析の基礎モデルを構築し，ハイブリッド型中継器を搭載した衛星通信システムの柔軟性の定量評価を実施した．まず，システム解析の基礎モデルについて検討し，通信システムの柔軟性評価のためにはシステム定義・要求定義が必要であることを述べた．そのため，システム定義としてハイブリッド型中継器を搭載した衛星通信システムの通信のモデル化を行い，要求定義として要求チャンネル数の平均値とばらつきの範囲をメトリックとして定めた．そして，システム解析の基礎モデルを用いた検証としてチャネライザのポート数が衛星通信システムの柔軟性に与える影響について評価を行った．評価の結果，構築したシステム解析の基礎モデルが正確に衛星通信システムの柔軟性を評価可能であることを示した．

## 第5章

# システム解析モデルの適用

### 5.1 はじめに

本章では，第4章で構築したシステム解析の基礎モデルを用いてビームホッピング機能を持つ衛星通信システムの柔軟性に関する定量評価を行う．柔軟性評価にあたっては第4章と同様に，まずシステム定義としてビームホッピングの通信のモデル化を行う．その後，要求定義として衛星通信システムへの要求を二つのメトリックを用いて定義し，性能評価を実施する．柔軟性評価を行うことで構築したシステム解析の基礎モデルがハイブリッド型中継器搭載衛星通信システムと異なる衛星通信システムにおいても柔軟性を評価可能であることを検証する．



## 5.2 ビームホッピングの通信のモデル化

本節ではビームホッピングを用いた通信に関してモデル化を行う。まず、ビームホッピングにおいてビームを照射する候補となるエリアをセルと呼称し、セルの数を  $m$  とする。その中で、同時にビームを照射することができる数をビーム数として  $N_b$  と表す。衛星通信システムとしては同時に照射するビーム数分の増幅器を搭載すればよい。図5.1にビーム数とセル数の関係を表す。図5.1では斜線の部分にビームが照射されており、白いエリアにはビームが照射されていない状態を表している。このとき、衛星通信システムではセルの中からビームを照射する

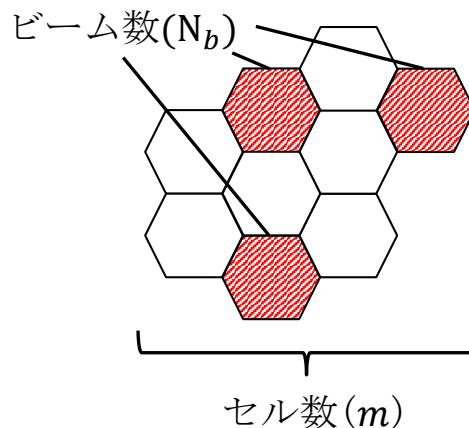


図 5.1: セルとビーム

ものをタイムスロットごとに選択する必要がある。セルに対してタイムスロットごとにビームを照射することにより通信リソースを割り当てるため、ビームホッピングにおけるリソース割り当てはセルへのタイムスロット割り当てであると考えることができる。そこで、本研究で想定するセルへのタイムスロット割り当て方法について説明する。本章の通信システムに関しても偏波を利用するものと

し、図5.2に示すように、セルの行ごとにそれぞれの偏波を割り当ててるものとする。第4章で想定した衛星通信システムでは干渉を回避するため各ビームに異なる

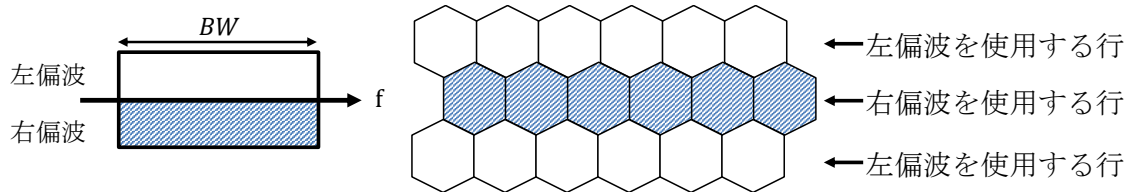


図 5.2: 偏波割り当て

る周波数を割り当てていたが、ビームホッピングを用いる場合は常に全てのセルにビームを照射する訳ではないため、周波数を分割することによって周波数利用効率が低下してしまう。そのため、想定する衛星通信システムでは割り当てられた周波数帯域全てをビームに割り当ててるものとする。図5.2のように偏波を割り当てることで行の間では干渉は発生しない。衛星通信システムのセルサイズは直径300km程であるため、同一偏波を使用するセルは十分遠方にある。そのため、電波は減衰し同一偏波を使用するセルに与える影響は小さいため本研究では同一偏波を使用するビームからの干渉の影響は考慮しない。以上より、本研究では行間ではどのようにタイムスロットを割り当てても干渉の影響は無視できるとしているため、行内でのタイムスロット割り当てについて検討する。想定する通信方法では図5.3のように複数のセルをひとつのクラスタとし、クラスタ内で一つのビームを共用する。図5.3の例では3つのセルでクラスタを形成しているが、クラスタに含まれるセルの数  $N_{clu}$  は以下の式で表すことができる。

$$N_{clu} = \left\lceil \frac{m}{N_b} \right\rceil. \quad (5.1)$$

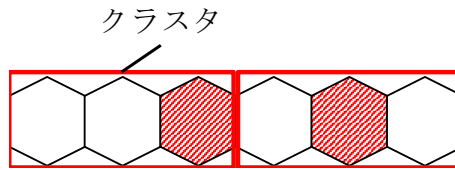


図 5.3: クラスタ

次に、クラスタ内でのタイムスロット割り当てについて検討する。タイムスロット割り当ての繰り返し単位をウィンドウ長と呼び、ウィンドウ長を  $W$  とする。想定する衛星通信システムではクラスタ内のセルに順番にタイムスロットを割り当てていき、ウィンドウ長分のタイムスロット割り当てが終了すると、また最初のセルにタイムスロットを割り当てる。各セルに割り当てるタイムスロット数は同数である必要はなく、ウィンドウ長のなかで割り当てるタイムスロット数を変更することができる。そのため、ウィンドウ長が大きいほどセルに割り当てるタイムスロット数を変化させることが可能であり、要求の偏りに対応することができるようになる。このとき、 $i$  番目のセルに割り当てタイムスロット数を  $n_i$  とすると  $n_i$  は以下の制約条件を満たす必要がある。

$$\{n_{(N_{\text{clu}} \cdot i + 1)} + n_{(N_{\text{clu}} \cdot i + 2)} + \dots + n_{(N_{\text{clu}} \cdot i + N_{\text{clu}})}\} \leq W. \quad (5.2)$$

$$(i = 0, 1, 2, \dots, N_b - 1)$$

式 (5.2) の制約条件はクラスタ内のセルに割り当てるタイムスロット数の総和がウィンドウ長を超過することはできないということを表している。クラスタ内でのタイムスロット割り当てに関しては式 (5.2) を満たす必要があるが、クラスタ間においては以下の制約条件を満たす必要がある。

$$\{n_{(N_{\text{clu}} \cdot i)} + n_{(N_{\text{clu}} \cdot i + 1)}\} \leq W. \quad (i = 1, 2, \dots, N_b) \quad (5.3)$$

クラスタ内においては式 (5.2) の制約条件を満たしていれば隣接ビームで同時にビームを照射することはない。しかし、各クラスタで独立してタイムスロット割り当てをする場合、クラスタの境界において隣接ビームに同時にビームを照射してしまう恐れがある。クラスタ境界のセルに割り当てるタイムスロットの総和がウィンドウ長を超過してしまうと必ず同時に隣接セルにビームを照射してしまう時間が発生するため式 (5.3) を満たす必要がある。

本研究においては性能を表す指標としてスループットを使用する。スループット  $T$  は以下の式で表すことができる。

$$T = \sum_{i=1}^m \left( \min \left( R_i, n_i \cdot \frac{\eta BW}{W} \right) \right). \quad (5.4)$$

$R_i$  は  $i$  番目のセルの要求レートを表しており、 $\eta$  はスペクトラム利用効率を表している。セルに対して十分な数のタイムスロット数が割り当てられている場合は要求レートがスループットとして求められるが、タイムスロット数が不足している場合は割り当てられたタイムスロット数で達成可能な伝送レートがスループットとなる。本章においては要求レートを送信するために必要なタイムスロット数を算出し、その要求タイムスロット数をもとにタイムスロット割り当てを実行する。このとき、目的関数は割り当てタイムスロット数であり、割り当てたタイムスロット数を最大化するように各セルへのタイムスロット割り当てを行う。前述の制約条件に加え、要求しているリソース以上にタイムスロットを割り当ててしまうことを防ぐ制約条件が必要となるため、式 (5.5) の制約条件を追加する。

$$n_i \leq \left\lceil \frac{R_i \cdot W}{\eta BW} \right\rceil. \quad (5.5)$$

タイムスロット割当は制約条件を満たし割り当てタイムスロット数を最大化する線形計画法によって計算される。二つのメトリックによって定義される要求範囲

の各点においてスループットを評価することでビームホッピングを行う衛星通信システムの柔軟性評価を行う。次節では要求範囲の定義を行う。本章で定義したパラメータを表5.1にまとめる。

表 5.1: ビームホッピングを行う衛星通信システムのパラメータ定義

セル数	$m$
ビーム数	$N_b$
クラスタ内のセル数	$N_{clu}$
タイムスロット長	$t_s$
ウィンドウ長	$W$
周波数帯域幅	$BW$
$i$ 番目のセルの要求レート	$R_i$
$i$ 番目のセルの割り当てタイムスロット数	$n_i$

### 5.3 ビームホッピングを行う衛星通信システムへの 要求定義

次に、ビームホッピングを行う衛星通信システム要求範囲を定めるため、トラヒックの発生モデルについて説明する。本研究では各セルでの要求レートの地理的な偏りを切断正規分布を用いて定義する。切断正規分布は範囲指定のある正規

分布であり、 $a$  から  $b$  の区間の切断正規分布は以下の式で表現することができる。

$$f(x; \mu, \sigma, a, b) = \frac{\frac{1}{\sigma} \phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\frac{b-\mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a-\mu}{\sigma}\right)}. \quad (5.6)$$

ここで、 $\phi(x)$  は標準正規分布の確率密度関数であり、以下の式で表すことができる。

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right). \quad (5.7)$$

また、 $\Phi(x)$  は標準正規分布の累積分布関数であり、以下の式で表すことができる。

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \phi(t) dt. \quad (5.8)$$

このとき、 $\mu$  は平均を表し、 $\sigma^2$  は正規分布の分散を表している。一般的な正規分布では、 $-\infty$  から  $\infty$  まで積分することで1となる性質を持っているが、切断正規分布では  $a$  から  $b$  まで積分すると1となる。このような性質を持つ切断正規分布を用いて図5.4のように各ビームの要求レートを設定する。なお、本研究では行の間では干渉の影響はないものとしているため、切断正規分布も一行での要求レートを表している。本研究ではシステム解析モデルのメトリックとして地理的な要求レートのピークの数と標準偏差を用いた。ピーク数が1の場合のビームごとの要求レートの地理的な偏りを図5.5に表し、ピーク数が3の場合のビームごとの要求レートの地理的な偏りを図5.6に表す。ピーク数が2以上の場合は式(5.6)で表される切断正規分布がピーク数分存在しているものとし、ひとつの切断正規分布の存在範囲を狭めることで複数のピークが存在する場合の地理的偏りを表現している。このとき、複数の切断正規分布を用いて要求の地理的偏りを表すと全ビームの要求レートの総和が変化してしまうという問題がある。そこで、本研究では全ビームでの要求レートの総和が一定となるようにピークの値を調整してい

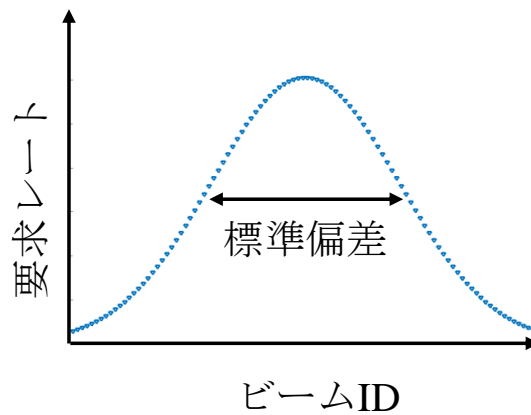


図 5.4: 要求レートの地理的分布

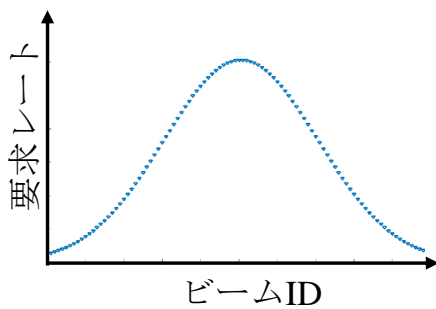


図 5.5: ピーク数が1の場合

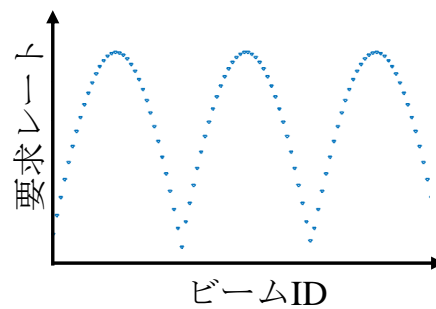


図 5.6: ピーク数が3の場合

る。そのため、ピークの数が多い程ピークの値は小さいものとなっている。つまり、ピークの数が多い場合はトラヒックの発生がより偏った状態を表しており、ピークの数が多い場合はトラヒック発生の変りが小さいという状態を表している。次に、標準偏差が小さい場合の要求レートの地理的な偏りを図 5.7 に表し、標準偏差が大きい場合の要求レートの地理的な偏りを図 5.8 に表す。図 5.7, 図 5.8 に示すように標準偏差が小さい場合はピークとその周りのビームの差が大きくなり、標準偏差が大きい場合はピークとその周りのビームの差が小さくなる。本研究では以上の二つのメトリックによってトラヒック発生の変りな偏りを表現し、要

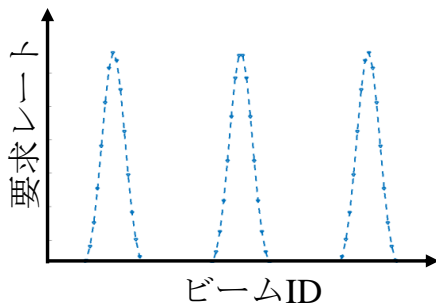


図 5.7: 標準偏差が小さい場合

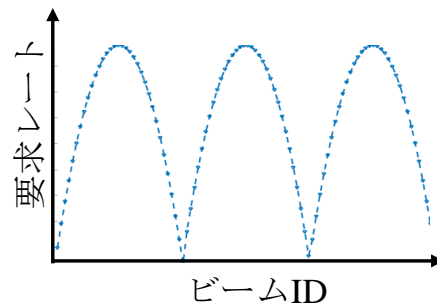


図 5.8: 標準偏差が大きい場合

求範囲を定義する。次節では、定義した要求範囲におけるスループットを評価し、ビームホッピングを行う衛星通信システムの柔軟性評価を行う。

## 5.4 性能評価

本節では、第4章で構築したシステム解析モデルを用いてビームホッピングを行う衛星通信システムの柔軟性評価を行う。本解析では、衛星中継器の増幅器の数をパラメータとし、増幅器の数がスループットにどのような影響を及ぼすのかを評価する。図5.9に示すように、本解析の要求範囲はピーク数が1から10、標準偏差が1から20の範囲で定義した。増幅器の数は5, 10, 20, 50とした。また、その他のパラメータについては表5.2にまとめる。増幅器が20の場合の評価空間でのスループットの解析結果を図5.10に示す。第4章と同様に二次元のグラフを用いて説明を行う。ピークの数を変化させた2つのケースと標準偏差を固定し、ピークの数を変化させた2つのケースについて紹介する。図5.11に示す1つ目のケースではピーク数を1とし、標準偏差を1から20まで変化した。ピーク数が1の場合は標準偏差の値に関わらず増幅器の数が多い程高



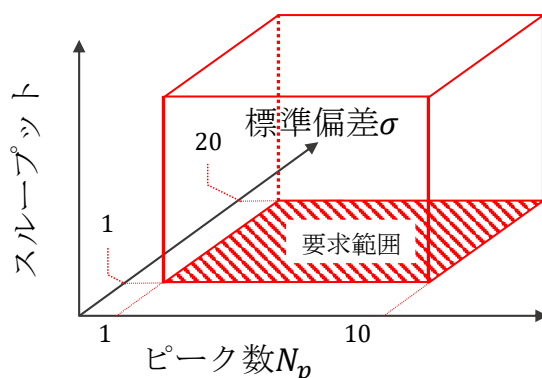


図 5.9: 評価空間

表 5.2: ビームホッピングを行う衛星通信システムの解析におけるパラメータ設定

ビーム数 ( $N_b$ )	100
ウィンドウ長 ( $W$ )	12
周波数帯域幅 ( $BW$ ) [MHz]	500
スペクトラム利用効率 ( $\eta$ )	0.5
全セルの総要求レート [Gbps]	3

いスループットを達成している。また、どの増幅器数の場合においても標準偏差が大きくなる程スループットが高くなっている。ビームホッピングでは、クラスターごとにタイムスロットを分け合うことで通信環境を提供している。そのため、クラスター内のビームにおいて要求レートに偏りがあった場合でも要求レートが小さいビームに割り当てられているタイムスロットを要求レートが大きいビームに割り当てることで柔軟に通信リソースを割り当てることが可能である。しかし、クラスターでの総要求レートに偏りがあった場合はクラスター間でのタイムスロット

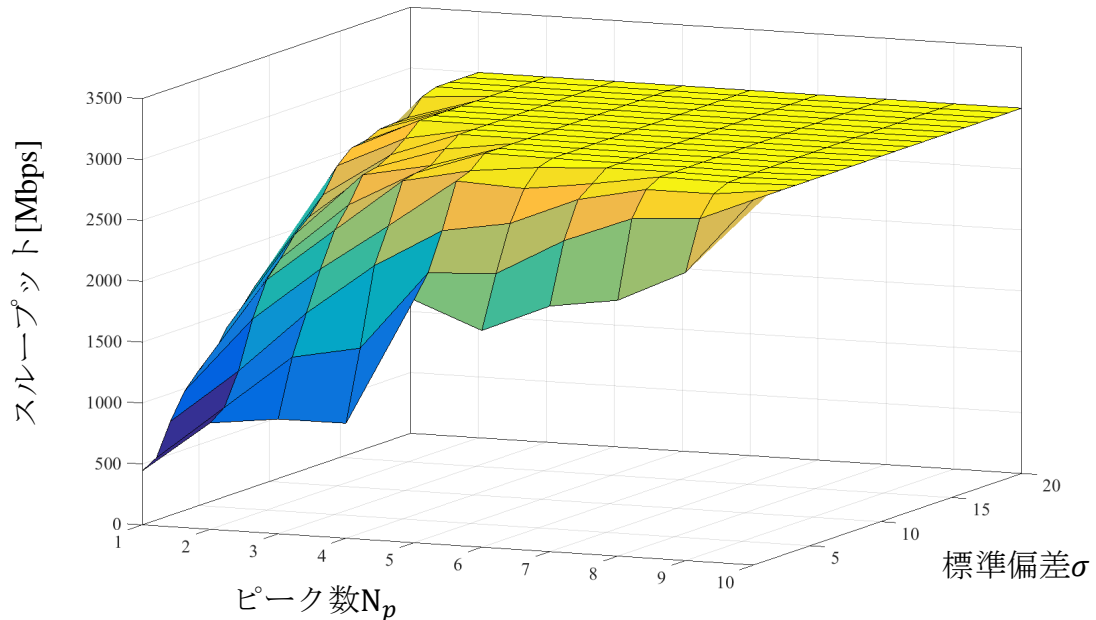


図 5.10: 評価空間におけるスループット

のやり取りはできないため、スループットが低下してしまう。ピーク数が1の場合はピークが含まれるクラスタの総要求レートが大きくなり、クラスタ間で偏りが発生してしまうためスループットが低下する。クラスタ間での総要求レートの偏りは標準偏差が小さいほど大きく、標準偏差が大きくなるにつれて小さくなりスループットは増加する。増幅器数が50の場合は標準偏差が大きくなってもスループットが3Gbps以上になることはなかった。本解析では全ビームの要求レートの総和を3Gbpsとしているため、それ以上のスループットを達成することはできない。次にピーク数を6とし、標準偏差を変化させたケースを図5.12示す。このケースにおいても増幅器が多い方が高いスループットを達成している。また、標準偏差が大きくなるとスループットが高くなるという関係もピーク数が1の場合と同様である。前述の通りスループットが3Gbps以上になることはないが、増

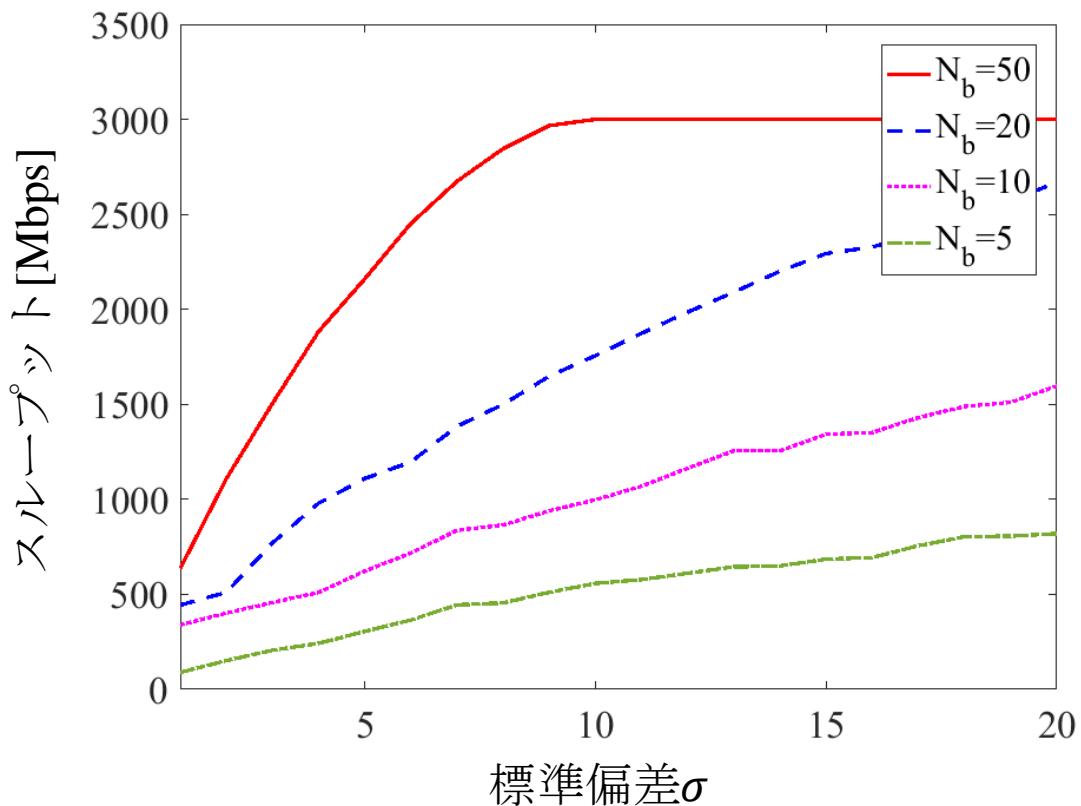


図 5.11: ピーク数が1の場合のスループット

増幅器が50の場合で3Gbpsとなる標準偏差の値はピーク数が1の場合と比較して小さくなっている。ピーク数が多い程ビーム間の要求レートのばらつきが小さくなり、容易にトラフィックを収容できるためである。また、ピーク数が6の場合は増幅器が20の場合でも3Gbpsを達成している。増幅器が10の場合と5の場合は標準偏差が大きくなるにつれてスループットも大きくなっているが、ある値でピークを迎え、その後ピークと比較するとスループットが少し小さい値で一定となっている。以下ではこの原因について考察を行う。まず、図5.13に増幅器数が50、標準偏差が6の場合の各ビームの要求レートと割り当てたタイムスロットによって達成される伝送レートを示す。これは図5.12におけるある点でのタイムスロット

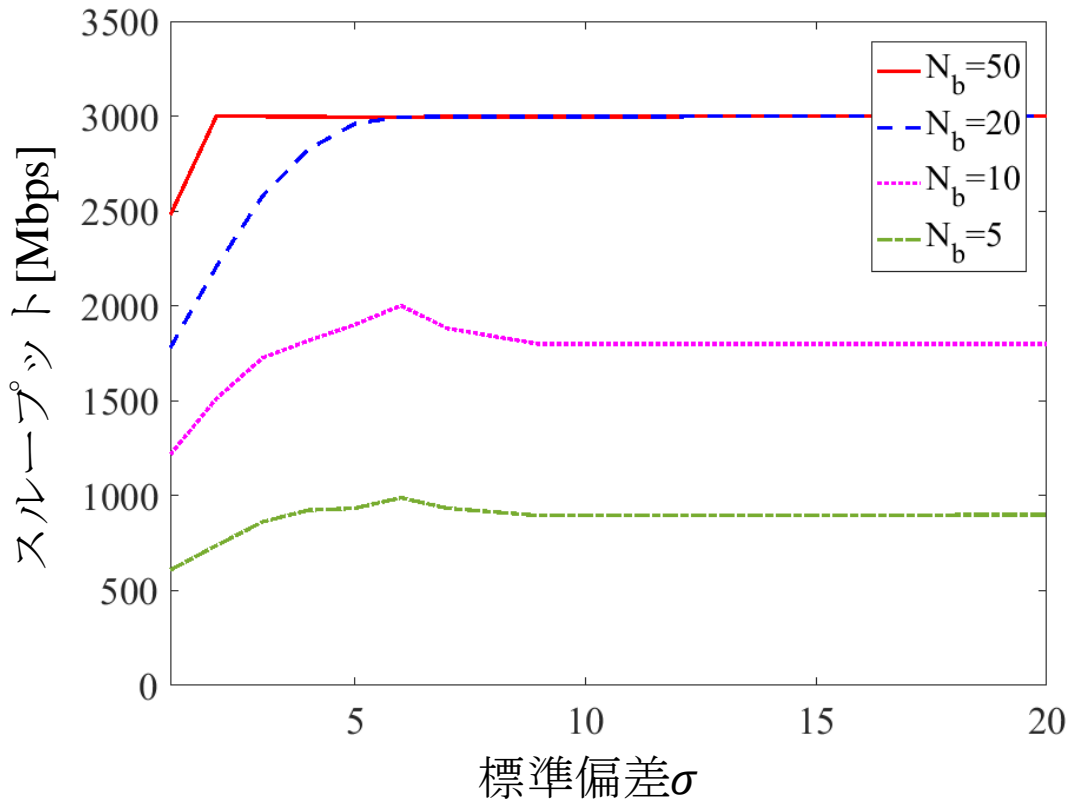


図 5.12: ピーク数が6の場合のスループット

ト割り当てについて表したものである。図 5.13 では割り当てたタイムスロットで達成される伝送レートが全てのビームの要求レートを上回っているため、総要求レートである 3Gbps を達成することができている。続いて、図 5.14 に増幅器数が 10、標準偏差が 5 の場合の各ビームの要求レートと割り当てたタイムスロットによって達成される伝送レートを示し、図 5.15 に増幅器数が 10、標準偏差が 6 の場合の各ビームの要求レートと割り当てたタイムスロットによって達成される伝送レートを示す。図 5.13 の例では増幅器が 50 あるため、1 クラスタに含まれるビーム数は 2 であり、2 つのビームで一つの増幅器を共用していた。図 5.14、図 5.15 の例では 10 のビームで増幅器を共用しなければならないため、全てのビームに十分

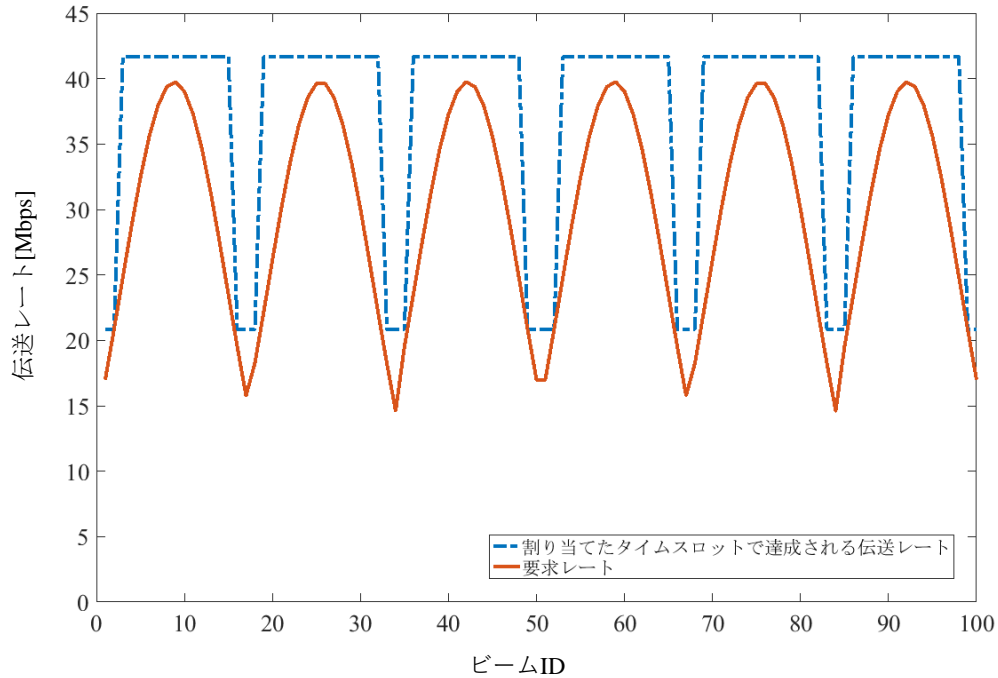


図 5.13: 増幅器数が 50, 標準偏差が 6 の場合

にタイムスロットを割り当てることができず一部ではビームの要求しているレートを下回っている。割り当てたタイムスロットで達成される伝送レートとビームの要求レートのうち低い方がスループットとして計算されるため、このような場合では 3Gbps を達成することができない。本解析ではスペクトル利用効率を 0.5 とし、使用する周波数帯域は 500MHz, そしてウィンドウ長は 12 であるため、あるビームに 1 タイムスロットを割り当てた場合に達成される伝送レートはおよそ 20Mbps となる。図 5.14, 図 5.15 でタイムスロットを割り当てることで達成される伝送レートがおよそ 20Mbps の倍数であるのはこのためである。図 5.14 では最大で 3 タイムスロット割り当てられているビームがあるが、図 5.15 では最大でも 2 タイムスロットの割り当てに留まっている。これは標準偏差が大きくなることでビームの要求レートの最大値が小さくなったため 2 タイムスロット以上必要な

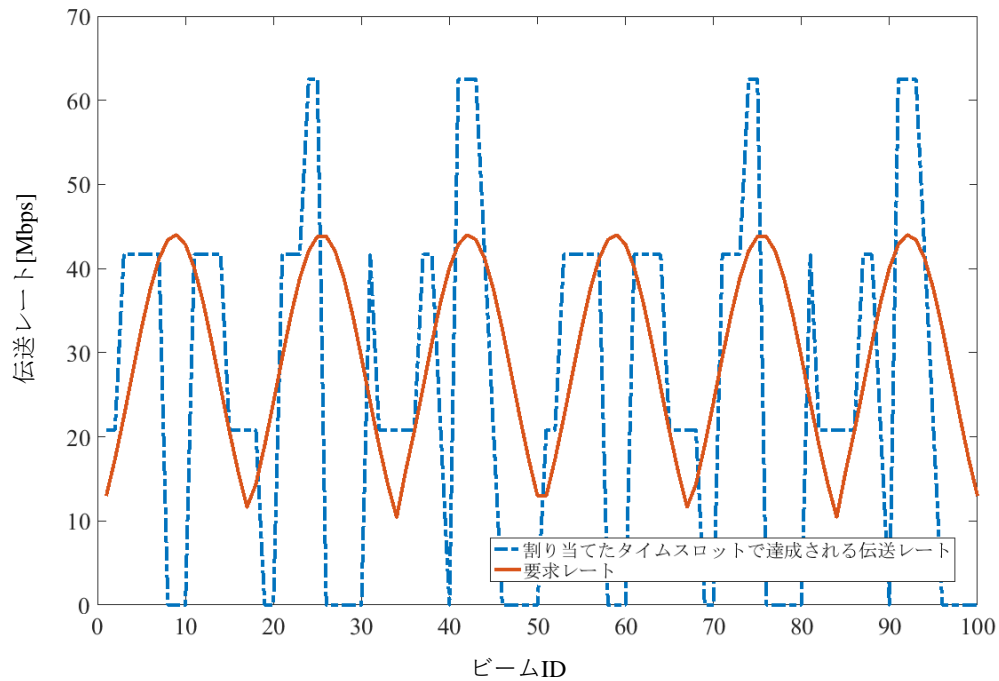


図 5.14: 増幅器数が10, 標準偏差が5の場合

ビームが存在しなくなったためである。割り当てたタイムスロットによって達成される伝送レートと要求レートの間には差がある場合、通信リソースの過剰な割当が発生していることになるため、可能な限り割り当てたタイムスロットによって達成される伝送レートと要求レートの間には差がないことが好ましい。標準偏差が5である図5.14の場合、要求レートが40Mbpsを上回っているビームが存在しているため2タイムスロットでは要求レートを達成することはできないが、3タイムスロットを割り当ててしまうと割り当てたタイムスロットによって達成される伝送レートと要求レートの間には大きな差が生じることとなる。その結果、必要なビームにタイムスロット割当を行うことができずスループットが低下してしまう。一方、標準偏差が6である図5.15の場合、要求レートが40Mbpsを上回っているビームが存在していないため2タイムスロットで要求レートを達成すること

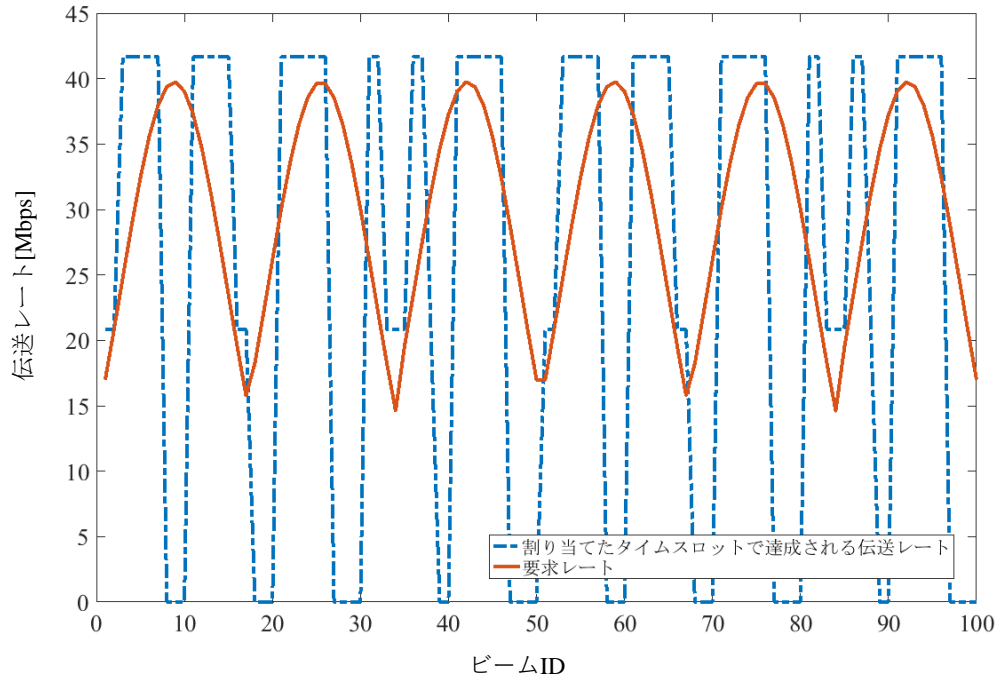


図 5.15: 増幅器数が 10, 標準偏差が 6 の場合

ができる。2タイムスロット割り当てた場合は割り当てたタイムスロットによって達成される伝送レートと要求レートとの差が小さいため、標準偏差が5の場合と比較してスループットが向上する。標準偏差がさらに大きくなった場合、ビームの要求レートの最大値が小さくなり割り当てたタイムスロットによって達成される伝送レートと要求レートとの差が大きくなるためスループットが低下していく。本研究では各ビームの要求レートを一度、その要求レートを達成するために必要なタイムスロット数へ変換し、線形計画法を実行している。標準偏差が9より大きい範囲では要求レートを必要なタイムスロット数に変換する際に同一の要求タイムスロット数となるため、スループットが一定となっている。図5.16に示す3つ目のケースでは標準偏差を6とし、ピーク数を1から10まで変化させた。3つ目のケースにおいても標準偏差を変化させた2つ目のケースと同様に増幅器

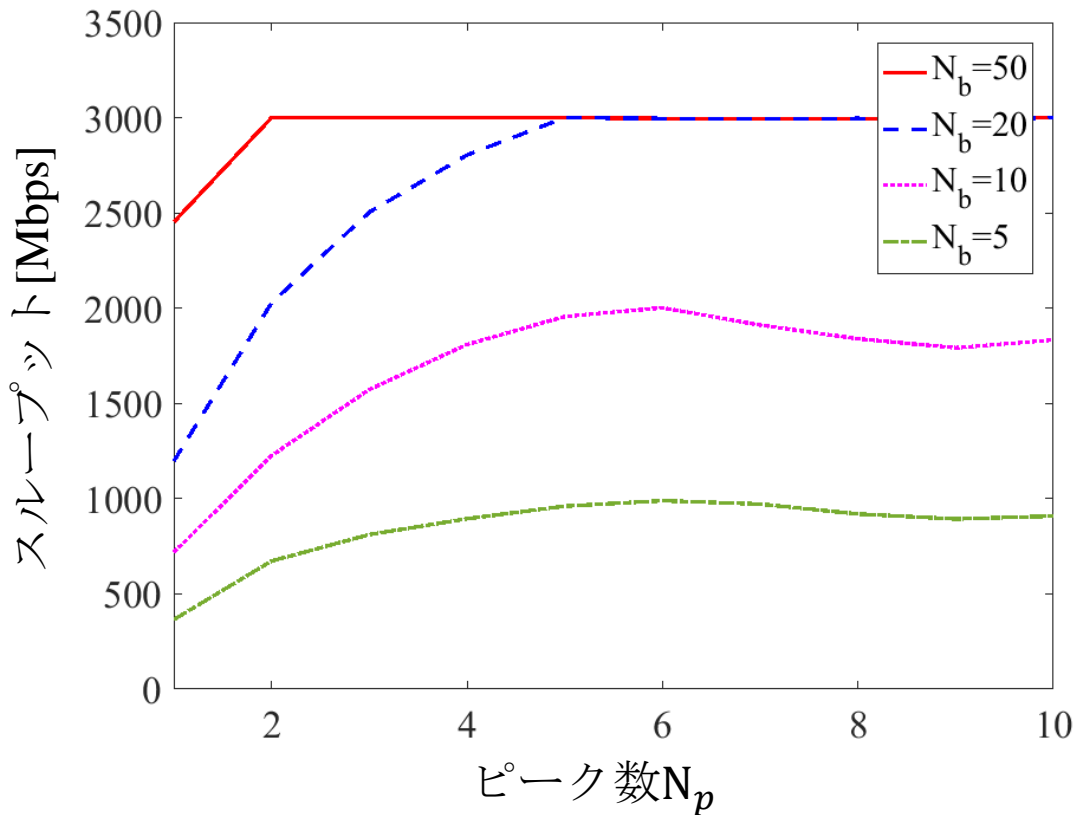


図 5.16: 標準偏差が6の場合のスループット

が50と20の場合では総要求レートである3Gbpsを達成している。また、増幅器数が10と5の場合においてもグラフの概形は図5.12と一致している。ピーク数が増加することでクラスタ間の要求レートの差が小さくなり、スループットは増加する。しかし、先程のケースと同様にピーク数が増加していくと要求レートの最大値が小さくなり、ある値で必要なタイムスロット数に変化する。必要なタイムスロット数の変化が発生したときスループットは最大となる。図5.16ではピーク数が6である場合にスループットが最大となっている。次に標準偏差を9とし、ピーク数を変化させたケースを図5.17示す。この場合もグラフの概形は3つ目のケースと同様であるが、スループットが最大となるピーク数が3つ目のケースと



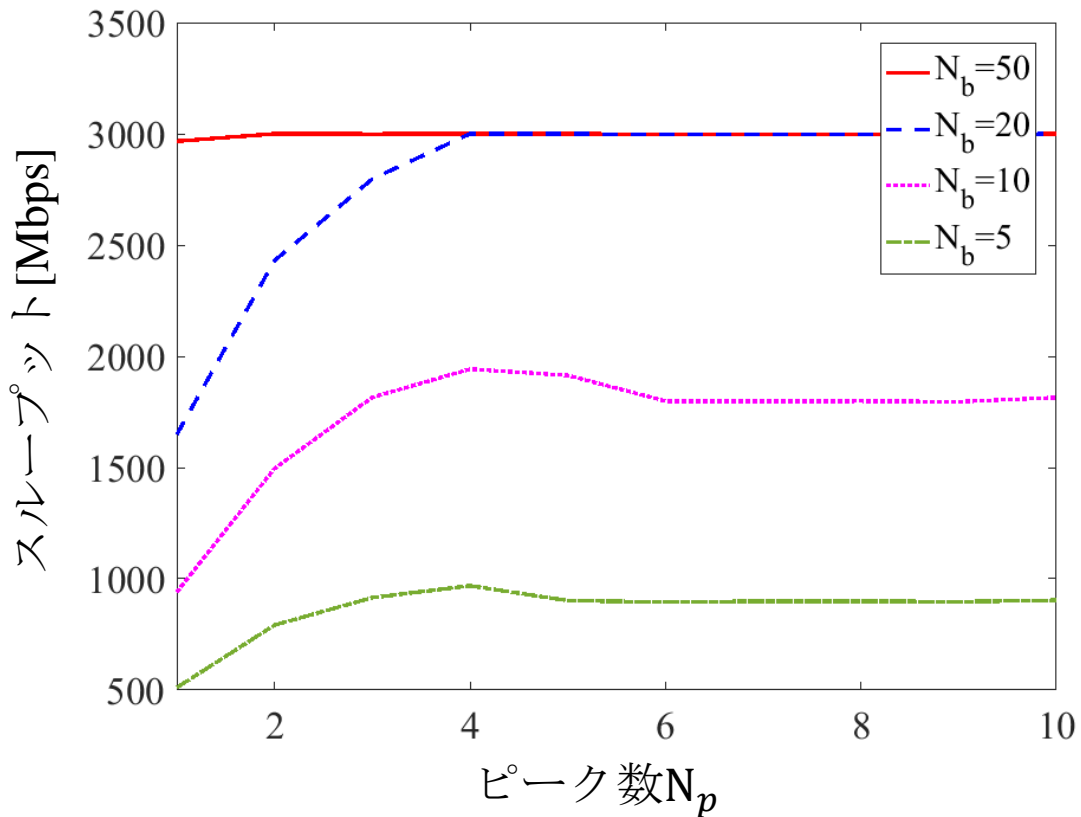


図 5.17: 標準偏差が9の場合のスループット

比較して小さくなっている。これは、標準偏差が大きい方がより小さなピーク数で必要なタイムスロット数の変化が発生するためである。

最後に評価空間の被覆率を図 5.18 に示す。本解析では、全セルの総要求スループットである 3Gbps を達成した場合を 1 として被覆率を算出した。増幅器数が多いほど被覆率が高くなり、より柔軟性の高い衛星通信システムであると言える。以上の評価結果から構築したシステム解析の基礎モデルがチャネライザ搭載衛星通信システムのみならずビームホッピングを行う衛星通信システムに対しても適用可能であることを示すことができた。また、増幅器数が 20 と 50 の場合の差は小さいことから、増幅器数が 20 の衛星通信システムに対して増幅器数を倍以上

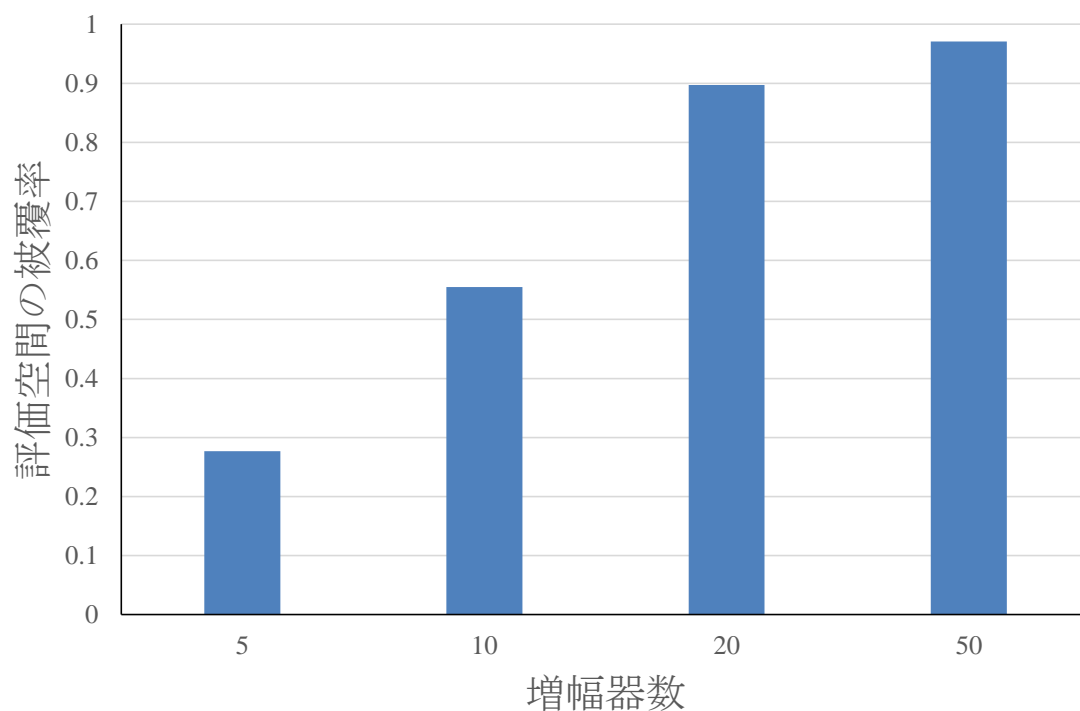


図 5.18: 評価空間の被覆率

に増やした場合でもその効果は小さいということがわかる。このように、本研究で構築した解析モデルを用いることで想定される要求範囲における通信システムの柔軟性を評価することが可能となり、システムの性能向上に向けた増強の効果を把握することも可能となる。

## 5.5 まとめ

本章では、構築したシステム解析の基礎モデルを用いてビームホッピングを行う衛星通信システムの柔軟性解析を実施した。まず、システム定義としてビームホッピングを行う衛星通信システムの通信のモデル化を行い、要求定義として各ビームの要求レートの地理的分布のピーク数と分散をメトリックとして定めた。そして、システム解析の基礎モデルを用いた検証として衛星に搭載する増幅器数が衛星通信システムの柔軟性に与える影響について評価を行った。評価の結果、システム解析モデルの有効性を示すことができた。

## 第6章

### 結論

近年、海域での通信手段としてだけでなく陸域におけるトラヒックの集中を解消するための手段として衛星通信が期待されている。また、大規模災害時における衛星通信のニーズは高まりつつあり、大容量通信を可能とするハイスループット衛星 (HTS) と呼ばれる衛星通信システムの開発が進んでいる。しかし、現在の HTS ではマルチビームへの周波数割当が固定であり、リソースの有効利用ができていないのが現状である。そのため、限られた衛星リソースで HTS の周波数利用効率を向上させる技術の開発が求められており、打ち上げ後であっても柔軟にリソース配分の変更が可能なフレキシビリティ化技術としてデジタルチャネライザやビームホッピング技術の開発が進んでいる。衛星通信システムへの需要を満たすためにはこのようなフレキシビリティ化技術の有効性を正確に評価し、有効な利用法を決定する必要がある。しかし、現状の衛星システムではシステムを取り巻く状態変化に対応したシステム評価モデルは存在せず、状態の変化を伴う中でシステムを定量評価することは難しい。そこで本論文では衛星通信システムの柔軟性評価方法に着目し、衛星通信システムの柔軟性を定量評価可能なシステム解析モデルの構築を行った。さらに、構築したシステム解析モデルを用いてデジ

タルチャネライザ搭載衛星とビームホッピング機能を有する衛星の二種類の衛星通信システムに対し柔軟性評価を実施した。解析を通じて衛星通信システムの柔軟性を定量的に評価可能であることを確認した。

以下では各章を振り返り、本論文の統括を行う。

■ **第1章** 本研究の背景，及びその目的について述べ，本研究分野の重要性について述べた。

■ **第2章** 衛星通信システムの現状としてハイスループット衛星の開発動向について述べ，デジタルチャネライザ搭載衛星の機能について説明を行った。また，ビームホッピング機能についても説明を行い，衛星通信システムの柔軟性についてまとめた。さらに，こうした機器や技術の関連研究についてまとめ，衛星通信システムの柔軟性を定量評価するための解析モデルが求められていることを述べた。

■ **第3章** システム解析モデルの構築に向け，まずはチャネライザ搭載衛星通信のモデル化を行い限定的な柔軟性解析を行った。また，本章での解析は限定的な状態での解析にとどまっており衛星通信システムの柔軟性解析には複数状態を考慮した総合的な評価が必要であることを述べた。

■ **第4章** 総合的な柔軟性評価を行うためシステム解析の基礎モデルを構築し，第3章でモデル化を行ったチャネライザ搭載衛星について基礎モデルを用いた柔軟性評価を行った。評価の結果，チャネライザの有効性を確認することで構築した解析モデルの有用性を確認した。

■ **第5章** 構築したシステム解析モデルを用いてビームホッピング機能を持つ衛星通信システムに関する評価を実施した。評価にあたってはチャネライザ搭載衛星の評価と同様にビームホッピングを用いた通信のモデル化を行い，システム

解析モデルを適用した。ビームホッピング機能を有する衛星通信システムに対しても、システム解析モデルを用いることでその有効性を評価可能であることを確認した。

以上のように、本研究では衛星通信システムの柔軟性を定量評価可能なシステム解析モデルの構築を行った。本研究の成果は、柔軟な衛星通信システムの実現に向けた評価方法の確立に寄与するものであると言える。

# 著作物利用許諾

本論文で用いている図表等は出版済みの文献から再利用したものを含む，本論文で再利用した文献のリスト及び著作物利用許諾を以下に示す．

- Kazuma Kaneko, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Amane Miura, and Morio Toyoshima, “An Evaluation of Flexible Frequency Utilization in High Throughput Satellite Communication Systems with Digital Channelizer,” *IEEE International Conference on Communications (ICC 2017)*, Paris, France, May 2017.
- Kazuma Kaneko, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Amane Miura, and Morio Toyoshima, “Construction of a Flexibility Analysis Model for Flexible High-throughput Satellite Communication Systems with a Digital Channelizer,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, In press.



RightsLink®

Home

Create Account

Help



**Title:** An evaluation of flexible frequency utilization in high throughput satellite communication systems with digital channelizer

**Conference Proceedings:** IEEE International Conference on Communications (ICC), 2017

**Author:** Kazuma Kaneko

**Publisher:** IEEE

**Date:** May 2017

Copyright © 2017, IEEE

LOGIN

If you're a [copyright.com](#) user, you can login to RightsLink using your [copyright.com](#) credentials. Already a [RightsLink](#) user or want to [learn more?](#)

### Thesis / Dissertation Reuse

**The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:**

*Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

*Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/rights\\_link.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html) to learn how to obtain a License from RightsLink.




If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.


BACK

CLOSE WINDOW

Copyright © 2018 [Copyright Clearance Center, Inc.](#) All Rights Reserved. [Privacy statement](#). [Terms and Conditions](#).  
Comments? We would like to hear from you. E-mail us at [customer@copyright.com](mailto:customer@copyright.com)





Requesting permission to reuse content from an IEEE publication

**Title:** Construction of a Flexibility Analysis Model for Flexible High-throughput Satellite Communication Systems with a Digital Channelizer

**Author:** Kazuma Kaneko

**Publication:** Vehicular Technology, IEEE Transactions on

**Publisher:** IEEE

**Date:** Dec 31, 1969

Copyright © 1969, IEEE

LOGIN

If you're a [copyright.com user](#), you can login to RightsLink using your [copyright.com](#) credentials. Already a [RightsLink user](#) or want to [learn more?](#)

### Thesis / Dissertation Reuse

**The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:**

*Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

*Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/rights\\_link.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html) to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW

Copyright © 2018 [Copyright Clearance Center, Inc.](#) All Rights Reserved. [Privacy statement.](#) [Terms and Conditions.](#) Comments? We would like to hear from you. E-mail us at [customercare@copyright.com](mailto:customercare@copyright.com)

## 参考文献

- [1] C. Perera, C. H. Liu, S. Jayawardena and M. Chen, "A Survey on Internet of Things From Industrial Market Perspective," in *IEEE Access*, vol. 2, pp. 1660-1679, 2014.
- [2] J. A. Stankovic, "Research Directions for the Internet of Things," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 3-9, Feb. 2014.
- [3] Yuichi Kawamoto, Zubair Md. Fadlullah, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, and Morio Toyoshima, "Prospects and Challenges of Context-aware Multimedia Content Delivery in Cooperative Satellite and Terrestrial Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 6, pp. 55-61, June 2014.
- [4] Yuichi Kawamoto, Hiroki Nishiyama, Zubair Md. Fadlullah, and Nei Kato, "Effective Data Collection via Satellite-Routed Sensor System (SRSS) to Realize Global-Scaled Internet of Things," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 10, pp. 3645-3654, Oct. 2013.
- [5] W. Kong et al., "A ground-based optical system for autonomous landing of a fixed wing UAV," *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nov. 2014, pp. 4797-4804.
- [6] W. Harbison and R. Gupta, "Long Range Inter-band Radio with the Processed Surrogate Satellite Waveform," *2014 IEEE Military Communications Conference*, Oct. 2014, pp. 507-512.

- 
- [7] C. McLain, S. Panthi, M. Sturza and J. Hetrick, "High throughput Ku-band satellites for aeronautical applications," *MILCOM 2012 - 2012 IEEE Military Communications Conference*, 2012, pp. 1-6.
- [8] J. Lei and M. . Vzquez-Castro, "Multibeam satellite frequency/time duality study and capacity optimization," in *Journal of Communications and Networks*, vol. 13, no. 5, pp. 472-480, Oct. 2011.
- [9] C. Morel, P. D. Arapoglou, M. Angelone and A. Ginesi, "Link Adaptation Strategies for Next Generation Satellite Video Broadcasting: A System Approach," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 61, no. 4, pp. 603-614, Dec. 2015.
- [10] X. Kan and X. Xu, "Energy- and spectral-efficient power allocation in multi-beam satellites system with co-channel interference," *2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP)*, Nanjing, China, Oct. 2015, pp. 1-6.
- [11] Y. Ding, Y. C. Jiao, L. Zhang and B. Li, "Solving Port Selection Problem in Multiple Beam Antenna Satellite Communication System by Using Differential Evolution Algorithm," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 10, pp. 5357-5361, Oct. 2014.
- [12] W. Wang, R. Wang, Y. Deng, W. Xu and L. Hou, "Improved digital beam-forming approach with scaling function for range multi-channel synthetic aperture radar system," in *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 10, no. 2, pp. 379-385, Feb. 2016.
- [13] Shigenori Tani, Katsuyuki Motoyoshi, Hiroyasu Sano, Atsushi Okamura, Hiroki Nishiyama, and Nei Kato, "An Adaptive Beam Control Technique for Q Band Satellite to Maximize Diversity Gain and Mitigate Interference to Terrestrial Networks," *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing (TETC)*. DOI : 10.1109/TETC.2016.2606107.

- 
- [14] H. Fenech, S. Amos, A. Tomatis and V. Soumpholphakdy, "High throughput satellite systems: An analytical approach," in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 51, no. 1, pp. 192-202, Jan. 2015.
- [15] L. Del Consuelo Hernandez Ruiz Gaytan, Z. Pan, J. Liu and S. Shimamoto, "Dynamic Scheduling for High Throughput Satellites Employing Priority Code Scheme," in *IEEE Access*, vol. 3, pp. 2044-2054, Oct. 2015.
- [16] D. Giggenbach, E. Lutz, J. Poliak, R. Mata-Calvo and C. Fuchs, "A High-Throughput Satellite System for Serving whole Europe with Fast Internet Service, Employing Optical Feeder Links," *Broadband Coverage in Germany. 9th ITG Symposium. Proceedings*, Apr. 2015, pp. 1-7.
- [17] A. Botta and A. Pescapé, "On the performance of new generation satellite broadband internet services," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 6, pp. 202-209, Jun. 2014.
- [18] C. McLain, S. Panthi, M. Sturza and J. Hetrick, "High throughput Ku-band satellites for aeronautical applications," *MILCOM 2012 - 2012 IEEE Military Communications Conference*, Orlando, Florida, USA, Oct.-Nov. 2012, pp. 1-6.
- [19] S. Dimitrov, S. Erl, B. Barth, S. Jaeckel, A. Kyrgiazos and B. G. Evans, "Radio resource management techniques for high throughput satellite communication systems," *2015 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, Paris, France, Jun.-Jul. 2015, pp. 175-179.
- [20] D. SERRANO-VELARDE, E. Lance, H. Fenech and G. E. Rodriguez-guisantes, "Novel dimensioning method for high-throughput satellites: forward link," in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 50, no. 3, pp. 2146-2163, Jul. 2014.
- [21] Shigenori Tani, Katsuyuki Motoyoshi, Hiroyasu Sano, Atsushi Okamura, Hiroki Nishiyama, and Nei Kato, "Flexibility-Enhanced HTS System for Disaster Management: Responding to Communication Demand Explosion in a Dis-

- aster,” *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing (TETC)*. DOI : 10.1109/TETC.2017.2688078.
- [22] J. Cherkaoui and V. Glavac, “Signal frequency channelizer/ synthesizer,” *2008 10th International Workshop on Signal Processing for Space Communications*, Rhodes Island, Oct. 2008, pp. 1-4.
- [23] Y. Fujino, T. Orikasa and N. Hamamoto, “Measurement experiment of deployable large scale reflector antenna with DBF using A-METLAB,” *2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications*, Kyoto, Japan, May 2012, pp. 159-162.
- [24] Heng Yang, Jun-hong Dang, Ya-han Pan and Zuo-kun Li, “A digital channelizer design approach for broadband satellite communications based on frequency domain filter theory,” *Proceedings 2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC)*, Shengyang, China, Dec. 2013, pp. 2986-2990.
- [25] Y. Fujino, H. Tsuji, N. Komiyama and T. Orikasa, “Experimental study for DBF and channelizer for satellite/terrestrial integrated mobile communication system,” *2012 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Nagoya, Japan, Nov. 2012, pp. 720-723.
- [26] 内閣府, “次期技術試験衛星に関する報告書,”  
<http://www8.cao.go.jp/space/committee/27-minsei/minsei-dai4/siryou4.pdf>
- [27] P. Takats and P. Garland, “Evolution of regional multimedia satellite architectures,” *2000 IEEE Aerospace Conference. Proceedings*, Mar. 2000, pp. 255-260 vol.1.
- [28] A. Markhasin, “Satellite-based fully distributed mesh hybrid networking technology DVB-S2/RCS-WiMAX for RRD areas,” *2010 5th Advanced Satellite Multi-*

- 
- media Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop*, Cagliari, Italy, Sept. 2010, pp. 294-300.
- [29] Piero Angeletti, David Fernandez Prim, and Rita Rinaldo, "Beam Hopping in Multi-Beam Broadband Satellite Systems: System Performance and Payload Architecture Analysis," *24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC) and 4t*, San Diego, California, June 2006.
- [30] Avraham Freedman, Doron Rainish, Doron Elinav, "BEAM HOPPING SYSTEM DESIGN CONSIDERATIONS," *23rd Ka and Broadband Communications Conference*, Trieste, Italy, Oct. 2017.
- [31] A. Abdel Salam, M. Luglio, C. Roseti and F. Zampognaro, "Resource optimization over DVB-RCS satellite links through the use of SPDY," *2014 12th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt2014)*, Hammamet, Tunisia, May 2014., p. 63-69.
- [32] J. Lee, H. Noh, J. Lim and K. Kim, "Frequency Hopping Packing Algorithm for MF-TDMA with Various Types of Satellite Terminals," *2014 IEEE Military Communications Conference*, Baltimore, MD, USA, 2014, pp. 592-596.
- [33] A. Morell, G. Seco-Granados and M. A. Vazquez-Castro, "SAT03-3: Joint Time Slot Optimization and Fair Bandwidth Allocation for DVB-RCS Systems," *IEEE Globecom 2006*, San Francisco, CA, pp. 1-5, Dec. 2006.
- [34] I. Koutsopoulos and P. Constantinou, "Joint channel estimation and satellite antenna power control in mobile satellite networks using ray tracing," *2000 IEEE 51st Vehicular Technology Conference Proceedings (VTC2000-Spring)*, Tokyo, Japan, May 2000, pp. 1586-1590 vol.2.

# 発表文献一覽

## 学術論文

1. Kazuma Kaneko, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Amane Miura, and Morio Toyoshima, “Construction of a Flexibility Analysis Model for Flexible High-throughput Satellite Communication Systems with a Digital Channelizer,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, In press.
2. Kazuma Kaneko, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, and Morio Toyoshima, “An Efficient Utilization of Intermittent Surface-Satellite Optical Links by Using Mass Storage Device Embedded in Satellites,” *Performance Evaluation*, vol. 87, pp. 37-46, 2015.

## 国際会議論文（査読あり）

1. Amane Miura, Maki Akioka, Naoko Yoshimura, Kazunori Okada, Mitsugu Okawa, Hiromitsu Wakana, Shinichi Yamamoto, Takashi Takahashi, Kazuyoshi Kawasaki, Tomoshige Kan, Shinichi Kozono, Morio Toyoshima, Kazuma Kaneko, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Eiichi Sakai, Terumi Sunaga, Nobuyoshi Horie, Arimasa Kanasashi, Toshiyasu Tsunoda, Yuichi Yamamoto, Toshihiko Hayashi, Katsumi Tsukahara, and Hisayuki Mukae, “On Conceptual Design of Bandwidth-on-Demand High Throughput Satellite Communications System Technology,” 23rd Ka and Broadband Communications Conference, Trieste, Italy, Oct. 2017.

2. Kazuma Kaneko, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Amane Miura, and Morio Toyoshima, “An Evaluation of Flexible Frequency Utilization in High Throughput Satellite Communication Systems with Digital Channelizer,” IEEE International Conference on Communications (ICC 2017), Paris, France, May 2017.
3. Kazuma Kaneko, Yuichi Kawamoto, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, and Morio Toyoshima, “An Efficient Utilization of Intermittent Satellite-to-Ground Links by Using Mass Storage Device Embedded in Satellites,” 2014 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2014), Austin , Texas , USA , Dec. 2014.
4. Kazuma Kaneko, Yuichi Kawamoto, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Shinichi Yamamoto, and Naoko Yoshimura, “An Intelligent Routing Scheme Effectively Utilizing Mass Storage Embedded on Satellites to Mitigate Network Congestions,” ACM/IEEE International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), Barcelona, Spain, Nov. 2013.

## 国際会議論文（査読なし）

1. Amane Miura, Maki Akioka, Naoko Yoshimura, Kazunori Okada, Kenji Suzuki, Hiromitsu Wakana, Shinichi Yamamoto, Takashi Takahashi, Kazuyoshi Kawasaki, Tomoshige Kan, Shinichi Kozono, Toshihiro Kumooka, Testuharu Fuse, Hiroo Kunimori, Yoshisada Koyama, Yasushi Munemasa, Hideki Takenaka, Kolev Dimitar, Alberto Carrasco-Casado, Morio Toyoshima, Kazuma Kaneko, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Eiichi Sakai, Terumi Sunaga, Nobuyoshi Horie, Arimasa Kanasashi, Toshiyasu Tsunoda, Yuichi Yamamoto, Yoshifumi Goto, Toshihiko Hayashi, Katsumi Tsukahara, and Hisayuki Mukae, “Research Plan of R&D of Bandwidth-on-Demand High Throughput Satellite Communications System,” 31st International symposium on space technology and science, Ehime, Japan, Jun. 2017.



2. Kazuma Kaneko, Hiroki Nishiyama, and Nei Kato, “A Study on the Analysis of Flexible Frequency Utilization in Satellite Communication Systems with Digital Channelizer,” IEICE Technical Report, vol. 116, no. 319, SANE2016-53, pp. 11-14, Nov. 2016.
3. Kazuma Kaneko, “An Analysis on Communication Performance in System Integrated Terrestrial and Satellite Networks,” Annual Workshop on A3 Foresight Program, Pyeongchang, Korea, Jul. 2016.
4. Kazuma Kaneko, “A Study on Fair Frequency Assignment Technique in the System Integrated Terrestrial and Satellite Networks,” Annual Workshop on A3 Foresight Program, Okinawa, Japan, Feb. 2016.
5. Kazuma Kaneko, “A Study on Effective Data Transmission Scheme for Earth Observation Optical Satellite Networks,” Annual Workshop on A3 Foresight Program, Busan, Korea, Feb. 2015.
6. Kazuma Kaneko, Zubair Md.Fadullah, Hiroki Nishiyama, and Nei Kato, “Routing for Satellite Networks Considering a Mass Storage Device,” Annual Workshop on A3 Foresight Program, Jeju, Korea, Feb. 2013.

## 研究会発表

1. 三浦周、秋岡眞樹、吉村直子、岡田和則、鈴木健治、大川貢、若菜弘充、山本伸一、高橋卓、川崎和義、菅智茂、小園晋一、久保岡俊宏、布施哲治、國森裕生、小山善貞、宗正康、竹中秀樹、コレフディミタル、アルベルトカラスコカサド、豊嶋守生、金子和真、西山大樹、加藤寧、坂井英一、須永輝巳、堀江延佳、金指有昌、角田聡泰、山本裕一、林俊彦、塚原克己、迎久幸 “ニーズに合わせて通信容量や利用地域を柔軟に変更可能なハイスループット衛星通信システム技術の研究開発の状況,” 電子情報通信学会総合大会, B-3-10, Mar. 2017.

2. 金子和真、西山大樹、加藤寧、三浦周、豊嶋守生 “デジタルチャネライザ搭載衛星におけるフレキシビリティ性評価に関する検討,” 電子情報通信学会総合大会, B-3-11, Mar. 2017.
3. 金子和真、西山大樹、加藤寧、三浦周、豊嶋守生 “衛星通信システムのシステム解析モデル構築に向けた検討,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-3-21, Sep. 2016.
4. 金子和真、西山大樹、加藤寧 “衛星通信システムの周波数フレキシビリティ性評価のためのモデル構築に関する初期検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 116, no. 183, SAT2016-51, pp. 101-104, Aug. 2016.
5. 金子和真、西山大樹、加藤寧 “不安定な光リンクを用いた地球観測データの効率的な転送方法に関する検討,” 電子情報通信学会総合大会, B-3-25, Mar. 2015.
6. 金子和真、西山大樹、加藤寧 “ヘテロジニアスネットワークにおける通信方式決定に関する一考察,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 113, no. 436, SAT2013-52, pp. 11-16, Feb. 2014.
7. 金子和真、西山大樹、加藤寧 “衛星ネットワークにおける大容量ストレージを考慮した効率的なルーティングに関する検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 113, no. 32, SAT2013-3, pp. 1318, May 2013.

## 受賞

1. The IEEE ComSoc Sendai Chapter Student Excellent Research Award 2014 “An Efficient Utilization of Intermittent Satellite-to-Ground Links by Using Mass Storage Device Embedded in Satellites ”
2. 平成 26 年度東北大学大学院情報科学研究科長賞
3. 平成 27 年度電子情報通信学会学術奨励賞

4. IEEE International Conference on Communications (ICC 2017) Best Paper Award  
“ An Evaluation of Flexible Frequency Utilization in High Throughput Satellite  
Communication Systems with Digital Channelizer ”

# 謝辞

本稿は、東北大学大学院情報科学研究科情報通信技術論研究室（加藤・西山研究室）において筆者が行った研究を博士論文としてまとめたものである。

本研究を行うにあたり、東北大学大学院情報科学研究科 加藤寧教授には、研究の機会を与えて頂き、時に厳しく、時に優しく御指導・御鞭撻を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

東北大学大学院情報科学研究科 周暁教授には、本研究についてさまざまな御助言や御指導を頂きました。心から深く感謝致します。

東北大学大学院情報科学研究科 菅沼拓夫教授には、本研究についてさまざまな御意見や御討論を頂きました。心から深く感謝致します。

東北大学大学院情報科学研究科西山大樹准教授には、本研究全般にわたり日頃から御討論・御助言を頂きました。また、日常生活の中でも様々な御助言を頂き、人間的成長のきっかけを与えて頂きました。深く感謝致します。

東北大学大学院情報科学研究科 Zubair Md. Fadlullah 助教には、日頃のゼミや研究生活、論文執筆において大変御世話になりました。深く感謝致します。

東北大学大学院情報科学研究科 川本雄一特任助教には、研究の進め方のみならずスポーツに関しても多大なご支援を頂きました。研究室生活を楽しく送れたのは川本先生のおかげだと思っています。心から感謝致します。

東北大学大学院情報科学研究科事務補佐員 白石元子さんには、日常の快適な研究生活を送る上で大変御世話になりました。深く感謝致します。

加藤研究室の学生の方々、そして先輩方には、本研究に対する御討論、さらには研究生活において多大な御力添えを頂きました。心から感謝致します。

三菱電機株式会社情報技術総合研究所 谷重紀様には研究に関するアドバイス

や，衛星通信に関する研究動向や開発動向について貴重なご意見を頂きました。深く感謝致します。

また，研究室以外のさまざまな場面で御世話になった友人や親戚の皆様に感謝致します。

最後に，精神面・金銭面をはじめさまざまな場面で支え続けながら常に私の意志を尊重し応援してくれた両親には感謝してもしきれません。

皆々様の御力添えなしには，本論文の完成はありませんでした。ここに深く感謝の意を表します。本当にありがとうございました。

2018年1月