

地上／衛星共用携帯電話システム

における

高効率なトラヒック制御技術

に関する研究

遠藤 邦夫

電気通信大学大学院  
情報システム学研究科  
情報ネットワークシステム学専攻

博士(工学)の学位申請論文

2019年3月

地上／衛星共用携帯電話システム

における

高効率なトラヒック制御技術

に関する研究

博士論文審査委員会

主査 加藤 聰彦 教授

委員 長岡 浩司 教授

委員 本多 弘樹 教授

委員 大坐 島 智 准教授

委員 岡田 和則 客員教授

著作権所有者

遠藤 邦夫

2019

# 論文の英文要旨

T I T L E	Research on highly efficient traffic control technology for terrestrial / satellite shared mobile phone system
N A M E	Kunio Endoh

The satellite communication system STICS (Satellite / Terrestrial Integrated Communications Systems), which can communicate with both the terrestrial mobile phone system and the satellite mobile phone system, is expected to be useful for securing communication infrastructure such as disasters. However, the practical use of this system has a big problem that the communication capacity of the satellite system is very small as compared with the ground system. In response to this problem, this paper examined using the satellite limited communication resources with high efficiency.

First, it shows that the subband width which is the unit of frequency exchange of the digital channelizer controlling the order and path of the traffic flow of the satellite influences the frequency utilization factor, and the subband width condition , Including the case of considering

the difference in traffic volume between terrestrial and marine areas.

Next, at the time of a large-scale disaster, it is expected that the communication request will suddenly increase, and conversation requests more than the capacity will concentrate on the satellite system. In this case, it is necessary to perform CAC (Call Admission Control) which is a flow rate control of traffic. As a highly efficient CAC, we propose three CACs focused on fairness of user's communication opportunities. By the proposed CAC, controlled the reduction of the user's re-communication unavailable time, connection waiting time, and recall frequency. As a result of the simulation, it was confirmed that the user with long waiting time and the user with strong communication request can be selected and communication can be permitted.

The contents of this paper can be widely applied not only to STICS but also to multi-beam satellite communication system.

## 論文の和文概要

論文 題目	地上／衛星共用携帯電話システムにおける高効率なトラヒック制御技術に関する研究
氏 名	遠藤 邦夫
<p>一つの携帯端末で地上と衛星の双方と通信できるシステム（STICS）の実現において、衛星通信システムの通信容量が、地上システムに比較して極端に小さいことが、このシステムのボトルネックとなっている。本論文ではこの対策として、高効率なトラヒック制御技術の研究を行った。まず、衛星内制御として、衛星通信に割り当てられた周波数帯域を高効率で使用するために、衛星搭載用チャネライザの最適サブバンド幅の導出方法を示した。次にアドミッション制御（流量）として通信機会の公平性を重視した制御の方法を提案し、シミュレーション計算によって、提案した制御の効果を示した。</p>	

# 目 次

第 1 章	はじめに .....	1
1.1	研究の背景 .....	1
1.2	研究の目的 .....	3
1.3	本論文の構成と内容 .....	5
第 2 章	通信衛星システム概説とチャネライザ .....	7
2.1	衛星を利用した移動通信の歴史と現状 .....	7
2.2	衛星通信システムの要素技術 .....	11
2.2.1	ネットワークトポロジー .....	12
2.2.2	衛星通信回線の成立性 .....	15
2.2.3	衛星通信用周波数 .....	19
2.2.4	衛星通信システム容量 .....	22
2.2.5	周波数分割接続方式 .....	23
2.2.6	周波数再利用 .....	25
2.2.7	デジタルビームフォーミング .....	28
2.2.8	デジタルチャネライザ .....	30
第 3 章	STICS と呼受入制御 .....	38
3.1	STICS .....	38
3.1.1	STICS の利用イメージ .....	43
3.1.2	新規性 .....	44
3.1.3	衛星通信と既存地上通信との接続 .....	47
3.2	呼受入制御 .....	48
3.2.1	大規模災害時の通信状況 .....	49
3.2.2	災害時の輻輳と規制制御 .....	50
第 4 章	衛星のチャネライザの運用制御による高効率トラヒック制御 .....	53
4.1	概要 .....	53
4.2	STICS 衛星チャネル交換部 .....	54
4.2.1	SITCS 運用条件を想定したチャネライザとサブバンド幅への要求 .....	57

4.2.2	サブバンド検討の必要性.....	58
4.2.3	呼量均一条件での検討 .....	59
4.2.4	不均一呼量条件の検討 .....	64
4.2.5	均一呼量、不均一呼量条件での最適サブバンド幅.....	73
4.3	本章のまとめ .....	73
第5章	公平性を考慮した呼受入制御による高効率トラヒック制御.....	75
5.1	概要.....	75
5.2	大規模災害時の呼受け入れ制御.....	76
5.3	通信機会の公平性を重視した呼受入制御 (CACFC) .....	79
5.4	シミュレーションモデル及び条件.....	84
5.5	シミュレーション結果.....	87
5.6	本章のまとめ .....	94
第6章	結び .....	96
第7章	謝辞 .....	99
第8章	参考文献 .....	101
第9章	関連論文 .....	105



## 図の目次

図 1.1-1	STICS 地上/衛星共用携帯電話システム .....	2
図 2.2-1	スター型のネットワークトポロジーと放送衛星サービスのイメージ .....	12
図 2.2-2	スター型のネットワークトポロジーと衛星移動体通信サービスのイメージ .....	13
図 2.2-3	Fully Connect型のネットワークトポロジーと衛星移動体通信サービスのイメージ .....	14
図 2.2-4	BER 解析モデル .....	16
図 2.2-5	信号の位相空間コンスタレーション (QPSK) .....	16
図 2.2-6	回線計算要素 .....	19
図 2.2-7	ITU-R Radio Regulations region 区分け図 .....	20
図 2.2-8	FDMA チャンネル配置イメージ .....	23
図 2.2-9	FDMA 通信イメージ .....	25
図 2.2-10	地上システム 周波数再利用の例 .....	26
図 2.2-11	衛星システム 周波数再利用のための隣接ビームの干渉量 .....	28
図 2.2-12	デジタルビームフォーミングの基本構成 .....	30
図 2.2-13	チャネライザ機能 .....	31
図 2.2-14	デジタルチャネライザ効果イメージ .....	34
図 2.2-15	M 分割チャンネルフィルタバンク .....	36
図 3.1-1	STICS の衛星リンクイメージ .....	39
図 3.1-2	STICS 衛星ビーム配置図 .....	42
図 3.1-3	利用イメージ .....	44
図 3.1-4	クラスタ構成 .....	45
図 3.1-5	周波数帯域使用イメージ .....	45
図 3.1-8	衛星通信と既存地上通信との接続イメージ図 .....	48
図 4.2-1	STICS 衛星ミッションブロックイメージ .....	55

図 4.2-2	式中の記号の説明 .....	62
図 4.2-3	収容チャンネル数 .....	64
図 4.2-4	東日本クラスター .....	65
図 4.2-5	チャネライザ効果 .....	66
図 4.2-6	呼量不均一時におけるサブバンド幅の周波数利用率 特性.....	68
図 4.2-7	衛星ビーム種別の呼量不均一時におけるサブバンド 幅の周波数利用率特性.....	69
図 4.2-8	収容チャンネル数を考慮した周波数利用率 .....	72
図 5.3-1	接続長待ち時間優先制御のイメージ図 .....	82
図 5.3-2	再呼回数による優先制御イメージ .....	83
図 5.5-1	再通信要求不可時間特性(RSTC)のシミュレーション 結果.....	89
図 5.5-2	接続長待ち時間優先制御(PCLWC)のシミュレーショ ン結果.....	92
図 5.5-3	上限付き再呼受入回数優先制御(PCRCN) シミュレ ーション結果 .....	94

## 表の目次

表 2.1-1	軌道高度による特徴 .....	9
表 2.2-1	ITU-R Radio Regulations の Table of Allocations 抜粋 .....	20
表 3.1-1	STICS 通信諸元表 .....	38
表 3.1-2	STICS 衛星の回線計算表 .....	41
表 4.2-1	収容チャンネル数計算パラメータ .....	63
表 4.2-2	東日本クラスタにおける各ビームの呼量とリソース 配分の条件 .....	67
表 4.2-3	サブバンド幅 850kHz としたときの各ビームの帯域 .....	70
表 4.2-4	周波数利用率が極大となる条件 .....	71
表 5.5-1	シミュレーション時の回線状況 .....	90



# 第1章 はじめに

## 1.1 研究の背景

世界初の人工衛星スプートニクが打ち上げられたのは 1957 年のことである。最初の通信衛星は 1962 年のテルスター1号 (AT&T ベル研究所) とリレー1号 (NASA) であった。衛星を使って日本へ初めてニュース映像が送られたのは、翌年 11 月にこのリレー1号によるものであり、ジョン・F・ケネディ大統領暗殺の様子であった。これら周回衛星であり、通信時間は衛星と地上局がリンク確立できている時間だけであった。その後静止衛星により常時通信できる環境となった。1964 年の東京オリンピックでは静止衛星のシンコム 3号が使われた。衛星通信はその後目覚ましい発展を遂げ、現代の生活に不可欠なものになっている。

携帯端末についても発展が著しく、日本の携帯端末人口普及率は、1989 年では 0.3%程度であったが、総務省発表の報告書 (電気通信サービスの契約数及びシェアに関する四半期データの公表 (平成 28 年度第 4 四半期 (3 月末))) によれば、2017 年 3 月末時点の人口普及率は、128%で、数字上は国民全員が所有しているほどの普及がなされた。

情報通信研究機構では、一つの携帯端末で地上と衛星の双方と通信できる地上/衛星共用携帯電話システム (STICS; Satellite/Terrestrial Integrated mobile Communication System) [1]について研究が行われた。日常生活で使用している携帯端末が、衛星通信に使用可能となれば、基地局電波が届かない不感地帯に出してしまう心配が無くなる。このため、STICS が安全・安心な通信インフラとしての役割を担うことが

できると考えている。(図 1.1-11)



図 1.1-1 STICS 地上/衛星共用携帯電話システム

静止衛星による移動体通信は、専用端末では事業化されているものの、地上通信システムと共用するには多くの課題があることがわかっていった。例えば端末の通信性能が衛星地上局と比較して劣っているため、回線が成立しない問題がある。これについては STICS では、衛星に軌道上展開型の大口径アンテナを搭載してアンテナ利得を大きくすることでリンクマージンが確保できる可能性が見えてきた。陸域と海域では、通信用途が違うが、このような違いに対応するにはアンテナを複数枚用意して個別に対応する必要がある。しかし衛星搭載上の物理的な限界から搭載可能なアンテナ数の範囲でサービス地域を限定せざるを得なかった。フェーズドアレイアンテナを使用して衛星ビームを形成することで STICS ではおよそ 100 衛星ビームで日本及び排他的経済水域を覆う計画であるが、100 ビームのマルチビームシステムで、仮にすべてのビームが等分の帯域を割り当てられているとすれば、フィーダリンク帯域幅はユーザリンク帯域幅の 100 倍の帯域幅が必要となる。これに対しては、デジタルチャネライザによる解決が見込まれる。デジタルチャネライザによ

り、使用しているユーザリンク帯域のみ取り出してフィードリンク帯域に変換することができる。これにより、適切なフィードリンク帯域幅を確保すればよいことになる。

地震などによる大規模災害時には、基地局倒壊や津波、電力供給断などにより基地局が停波する。このような場合でも、衛星には災害による直接的な影響がないため、衛星システムにより通信を行うことができる。また、普段使い慣れていない通信手段やアプリケーションを災害時に利用することは難しいので使い慣れた通信手段をよりつながりやすくする研究[3]もある。STICS では、普段携帯し使い慣れている地上携帯端末から衛星システムにアクセスできるのでこのような問題がない。このように、STICS は大規模災害時の通信手段の確保の面からも、安全・安心に通信をいつでも提供できる通信インフラとしての役割も期待されている[2]。

## 1.2 研究の目的

災害時にトラヒックが急増することは地上移動体通信システムでも発生する。地上移動体通信システムでは常に回線容量増量、新技術による通信高速化といった設備対策を行っているのでトラヒック環境は改善する。しかし衛星通信では衛星は一度打ち上げると修理・変更ができないなど宇宙環境特有の特徴や、使用できる電力は太陽電池パドルからの発電量で制限される・地上～衛星間は必ず無線を介する必要がある、宇宙通信に使用できる無線周波数帯は限定的であるといった衛星リソースの限界から今後も通信容量が劇的に増えることはない。

そのような環境で STICS 衛星システムは地上システムからの大量の流入呼を受けてもシステムダウンせずに安全・安心な社会インフラとして通信環境を提供するシステム作りが必要となる。この課題解決の一環としてチャネライザの高効率運用と公平性を重視した

CAC の研究を行った。

STICS 衛星は日本及び排他的経済水域におよそ 100 個の衛星ビームを形成し、ビーム内の携帯端末とフィーダリンク局とを接続する。ユーザリンクからの呼をすべてフィーダリンク局へ伝送する場合には、ユーザリンクと同じフィーダリンク帯域幅が必要になる。しかし STICS の場合、平時は地上の通信回線を使用できることから衛星回線の使用頻度は高くない。このため使用する回線だけを取り出してフィーダリンクに交換すれば、使用する帯域幅は少なく済む。デジタルチャネライザは、任意の帯域幅をユーザリンク帯域からフィーダリンク帯域に交換する機能を有するので、有用であるが、移動体通信向け衛星通信にデジタルチャネライザを採用した実績が十分ないことから、その運用方法について研究をされた論文は見当たらない。

STICS 衛星のミッションリソース枠内にデジタルチャネライザの質量・電力を合わせるには、性能をできる限り落とさないで回路規模を小さくする必要がある。この課題への対応としてはサブバンドの導入が考えられる。サブバンドはチャンネルが複数個まとめられたチャンネル群である。交換をサブバンド単位にし、サブバンドに包含されるチャンネル数を多くすることで回路規模が小さくなり搭載性を高くすることができる。ここで、チャンネル単位で交換すると発呼要求に細かく対応出来るため周波数利用率が高くなるが、サブバンド単位だと空いているチャンネルもサブバンドの中に含まれることがあり、サブバンド幅が大きいと空チャンネルが含まれる確率が高くなり周波数利用率が低くなる。すなわちサブバンド幅の大きさを決定するには周波数有効利用と衛星搭載性という相反するテーマから最適値を探さなければならない。過去の研究の中には、衛星搭載性を加味してサブバンド幅の最適値を求めようとする研究は見当たらない。そこで、衛星搭載用デジタルチャネライザのサブバンド幅の検討を行った。



STICS は一般に普及している地上携帯端末が、地上基地局に接続できないときに衛星を介して通信できるという利便性がある。ここで、既に実用化されている衛星移動体通信システムは、専用端末を使用して通信を行うため、衛星の通信容量を考慮した上で、輻輳が生じないサービス端末数を決定できる。しかし、STICS では衛星の通信容量を超える端末数が存在することになる。これは STICS と他の移動体通信システムと大きく違う点である。しかも大規模災害時に地上通信システムのバックホールの役割を果たすためには、衛星の通信容量を超える発呼があった場合においてもシステムダウンすることなくサービスを継続できることが必要である。大規模災害時の通信要求は安否確認などの短時間の音声通信が求められる。また、単にシステムへの発呼規制を行うだけでは多くのユーザが通話できない結果が想定される。災害時の通信には、通話の成功回数が特定の端末に偏らずに配分されていること（通信機会の均等）。通信要求のタイミングと接続成功までの時間差が少ない（待ち時間の均等）。緊急性を考慮した接続（通信要求代償の均等）であることが必要である。通話要求に迅速に応えようとする呼受入制御の研究はあるが、災害時特有の通信要求に特化した衛星通信呼受入制御を研究した例はない。そこで STICS の運用条件に基づいた発呼条件を設定し、提案する呼受入制御の効果をシミュレーションにより明らかにした。

### 1.3 本論文の構成と内容

本論文の構成としては以下の通りである。2章にて、衛星を利用した移動通信の種類や衛星システムとこれを支える要素技術の概説について述べる。また、本論文の主要な研究テーマで取り扱う衛星搭載のデジタルチャネライザの概要について述べる。3章にて STICS の概要について述べ、第二の研究テーマである災害時の呼受入制御の背景となっている大規模災害時のトラヒック状況と問題について述べる。その後、4章では研究テーマのデジタルチャネライザの運用

制御による高効率トラヒック制御について述べる。5章では、トラヒックのアドミッション制御として通信機会の公平性を考慮した呼受け入れ制御について述べる。最後に6章で結びを述べる。

# 第2章 通信衛星システム概説と チャネライザ

本章では通信衛星を利用した衛星通信システムの概要について述べ、STICS 搭載予定のチャネライザの概要について述べる。これより、既存の地上移動体通信システムを地上システム、衛星を介した移動体通信システムを衛星システムとよぶ。

## 2.1 衛星を利用した移動通信の歴史と現状

衛星を使用した移動体通信の最初はインマルサットの船舶用衛星通信サービスであった。インマルサットは1982年に船舶向けの海事衛星通信サービスを開始し、その後サービス領域を航空、陸上に拡大している。1990年代になり、60~300機の衛星を低周回軌道に乗せて全地球移動体通信を行う気運が高まり、Iridium、Teledesic、SkyBridgeなどの事業化が進められた。その後、資金確保などの問題から事業中断や事業譲渡が行われている。維持費、周波数免許、ユーザ数の確保難などの理由から事業としては今尚、限定的である。

衛星移動体通信は大きく衛星の軌道位置で2種類に大別される。一つは低周回軌道で、もう一つは静止軌道である。

低周回軌道衛星による移動体通信システムはコンステレーションとも呼ばれる。コンステレーションとは星座を意味し、衛星同士が通信することで星と星がつながって一つの系を成すことをイメージしている。Iridium (米国)、Globalstar(米国)、Orbcomm (米国) が実施しており、多数の小型衛星を用いている。低周回軌道でのサービスの

メリットは、地上と衛星間の距離を短くして地上端末が小型化できること、電波の伝搬遅延時間を抑えられること、全地球でのサービスが可能であること、衛星が小型であるため、打ち上げロケットに複数機同時に搭載できること、衛星が比較的単純なことから開発期間が短く、複数機同時発注により1機当たりの衛星調達費を抑えられることがある。

静止軌道を利用したサービスは Inmarsat (英国)、N-Star (日本)、Thuraya (アラブ首長国連邦)、ACeS (Asia Cellular Satellite) (インマルサット) がある。静止軌道でのサービスのメリットは、衛星1機でサービスを行うことができること、衛星3機で全地球サービスが出来ること、衛星運用がし易いことがある。静止軌道を利用したサービスは衛星放送のように広い地域に同報できる効果が特徴的で災害時の多ユーザへの通知という利用も期待されている。デメリットでは、静止軌道は地表面から約36,000km上空であることから伝搬路による時間遅延(約240ミリ秒)が非常に大きい。同時に伝搬路による損失も非常に大きい。時間遅延が大きいことは通話しにくい他、LTE (Long Term Evolution ; 携帯通信規格の第3世代から第4世代への橋渡的な役割を持つ規格) の無線アクセスネットワーク (RAN: Radio Access Network) 内のデータ転送にかかる片道の遅延: 5ms は以下[40]に制御されることから地上移動体通信と共用する場合は大きな課題となる。衛星移動体通信の標準化について、静止衛星の通信環境(大伝搬損、高遅延)向けインタフェースとして Enhanced Geostationary Air Link (EGAL)が提案され地上系とのハイブリッド運用が検討されている。[4]

低軌道衛星の場合は、大気の抵抗により少しずつ高度が下がることから定期的に軌道高度を上げる制御が必要になる。推進剤を使用したアクチュエーターの場合は推進剤が枯渇したときが衛星寿命となる。このため静止衛星に比較すると衛星寿命は短い。低軌道衛星は多数の衛星を調達し、軌道上に配置してからでないサービスインできないことや前述の通り定期的に新しい衛星を打ち上げる計画が

ないとサービスが止まってしまう恐れがあることから初期投資が莫大になる。これら軌道高度の違いを表 2.1-1 にまとめた。

衛星軌道の違いはどちらもそれぞれ特徴があり、今後も目的の違いにより両者が使い分けられると考えられる。

表 2.1-1 軌道高度による特徴

	低・中軌道	静止軌道
伝搬路遅延	少ない	非常に多い
伝搬路損失	少ない	非常に多い
広域性	衛星間でハンドオーバーする機能を持たせれば広域性が確保できる。	広い
端末の特徴	ハンディ化の可能性あり	衛星の高EIRP(Equivalent Isotropically radiated Power)化を実現しなければ難
衛星調達の特徴	数十から数百機 大量調達により価格は抑えることができる	1機。ただしBCP(Business Continuity Planning)のために要バックアップ機
衛星寿命	数年。大気による抵抗のため落下する	約15年。推進装置の電化によりさらに伸びる見込み
事業性	初期投資が莫大で道半ば	専用端末で実現済み

衛星移動体通信システムのうち、事業化されているもの及び事業化の計画があるプロジェクトについて、概要を以下に示す。

#### ①Iridium

軌道高度 780km に 66 機の衛星が周回する。66 機の衛星は、北極・南極の両極近くで交差する 6 軌道面に、各 11 機ずつ配置されている。ユーザリンクは S バンド (2~4GHz 帯)、フィーダリンクは C バンド (4~8GHz 帯) を使用する。1999 年サービス開始。一度サービスを中断したが、現在は再開している。

#### ②Globalstar

軌道高度 1414km に 48 機の衛星が周回する。軌道傾斜角 52° の 8

軌道面に、各 6 機ずつ配置されている。ユーザリンクは S バンドと L バンド (1GHz 帯)、フィーダリンクは C バンドを使用する。衛星間通信が出来ないため全地球でのサービスは出来ず、主に北半球でサービスを行っている。

### ③Skybridge

軌道高度 1469km。軌道傾斜角  $55^{\circ}$  の 8 軌道面に、80 機配置する。ユーザリンクに Ku バンド (12~18GHz 帯) を使用するが、静止衛星システムと干渉するため静止衛星回避技術を使用する。

### ④Orbcomm

軌道高度 750km 軌道傾斜角  $70^{\circ}$  と  $108^{\circ}$  にそれぞれ 8 機、軌道高度 825km 軌道傾斜角  $45^{\circ}$  の 4 軌道面に各 8 機ずつ合計 48 機の衛星が周回する。ユーザリンクは VHF 帯を使用する。電子メール形式のデータ伝送サービスに特化している。

### ⑤Inmarsat

太平洋・大西洋 (東・西)・インド洋の 4 つの静止衛星を使用しており、南極と北極を除いた緯度 70 度以下の地域で、海上・陸上・空中を問わず通信が可能である。

2006 年に ACeS を買収した。ACeS は、東南アジアを中心とした地域向けの衛星電話サービスである。東南アジアの離島や地上基幹網の敷設が遅れている地域の通信環境を改善する。アジアに 140 のスポットビームを照射する。28,672 音声チャンネルを収容可能。

### ⑥ワンウェブ

高度 1200km の軌道に 648 機の衛星を打ち上げる。2018 年に最初の打ち上げを予定している。日本からソフトバンクグループが出資している。

### ⑦レオサット

高度 1400km の軌道に 108 機の衛星を打ち上げる。衛星間通信に光を使う。

### ⑧O3b ネットワークス

8063km の軌道に 10 機の衛星。Ka 帯を使用。インターネットサー

ビスを提供中。

#### ⑨N-Star

静止軌道、2機の衛星で日本の本土及びおおむね 200 海里にサービスしている。1996 年サービス開始。大規模災害に備えて公共施設に通信用端末が設置されている。地震などの大災害が発生すると、通常の電話回線は多くの通話が殺到して輻輳状態になるほか、電話回線が損傷すると通話そのものが不可能になる。その点、衛星電話は地上設備が比較的少なく設備損傷のリスクが少ないと考えられるため、地方自治体・警察・消防用の緊急電話回線が設置されている、

#### ⑩Thuraya

静止軌道。2機の衛星 各 200 ビーム ヨーロッパ/中央アジア/中東/北・中央アフリカ及びアジア/オセアニアをサービスエリアとして 13,750 の音声チャンネルを収容可能としている。2013 年サービス開始。

この他にスペース X 社による 1 万 1943 機の衛星を使用するスターリンク計画など移動体衛星通信には泡沫的で話題作りと思われるものも多くある。これらは、しばしばネットニュースなどで取り上げられ、内容が移りやすい。ただ、スペース X 社は Falcon Heavy の打ち上げを成功している。Falcon Heavy は Ariane5ES の 21t の 3 倍を超える 64t の最大積載量を誇り、コンステレーションに必要な多くの衛星を打ち上げに伴う費用を劇的に下げる可能性がある。

## 2.2 衛星通信システムの要素技術

衛星通信システムの分類として軌道により運用・サービスに特徴があることについて前節にて述べた。本節ではこれ以外の衛星システムについてその特徴を述べる。

衛星通信システムでは衛星の開発から設計・製造・打ち上げを経て軌道上で実運用に入るまでに少なくとも 4~5 年かかるうえ、衛星寿命約 15 年の間、装置を交換や、機能追加することはできない。開発

段階で最新技術を盛り込んだつもりでも衛星寿命末期には陳腐化してしまう問題がある。このため地上移動体通信システムで利用されている高速伝送機能を採用する場合は十分な検討が必要になる。特に近年地上の移動体通信の技術動向は発展が著しい。地上通信と衛星通信を接続するためには、特に衛星の特殊性を考慮したうえで構築する必要がある。

### 2.2.1 ネットワークトポロジー

通信相手の接続方法としてネットワークトポロジーがある。1 対多を接続するネットワークトポロジーがスター型と呼ばれる。放送サービスの同報などで利用され、衛星の広域性を最大限利用した概念である。放送衛星はスター型で片方向通信である。図 2.2-1 にスター型のネットワークトポロジーと放送衛星サービスのイメージを示す。

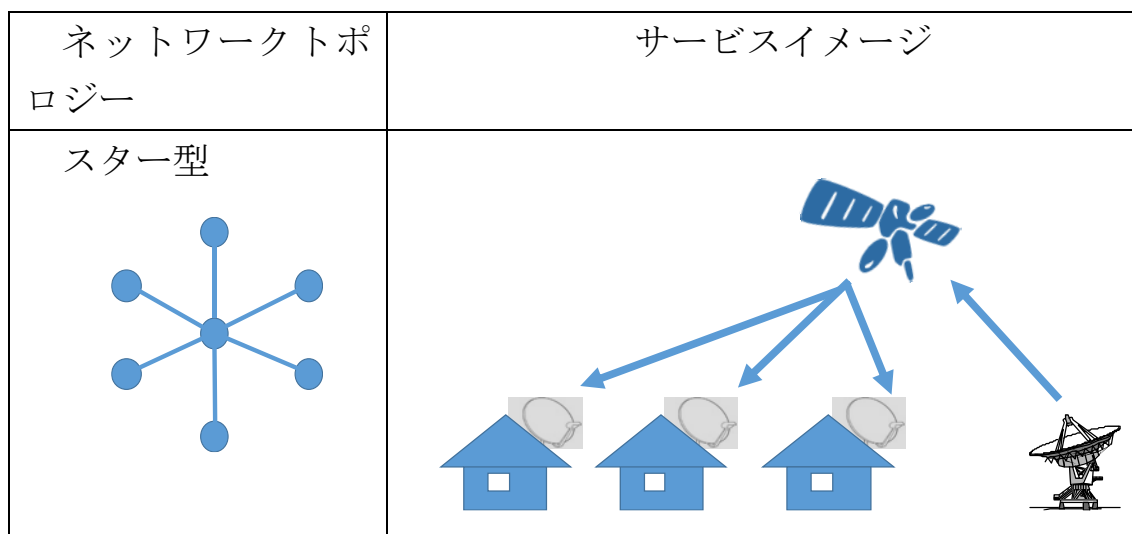


図 2.2-1 スター型のネットワークトポロジーと放送衛星サービスのイメージ

放送衛星サービスでは、コンテンツを衛星にアップリンクする地上局は 1 局ないし数局である。サービスを受ける一般家庭が受信局で、受信設備さえあれば多数設置できる。コンテンツ配信などを行う地上局と衛星を接続する回線をフィーダリンク、サービスを受ける



ユーザと衛星を接続する回線をユーザリンクと呼ばれる。スター型の片方向通信ではフィーダリンク通信容量とユーザリンク通信容量は同じ量である。このため、後に記述する多元接続などの処理は不要である。

衛星を利用した移動体通信は、スター型で双方向通信である。取り扱う信号内容は、ユーザごとに違う。多数のユーザの信号を、衛星でまとめてフィーダリンクとして接続するので、常にユーザリンクの信号を接続するためには、フィーダリンクの通信容量はユーザ数倍必要となる。但し、移動体通信サービスでは、通信の要求はユーザの判断により変化することから、完全にユーザリンク容量の等倍をフィーダリンクが必要とするとは言えない。いずれにしてもフィーダリンクとユーザリンクそれぞれに必要な通信量のアンバランスが発生する。図 2.2-2 にスター型のネットワークトポロジーと衛星移動体通信サービスイメージを示す。

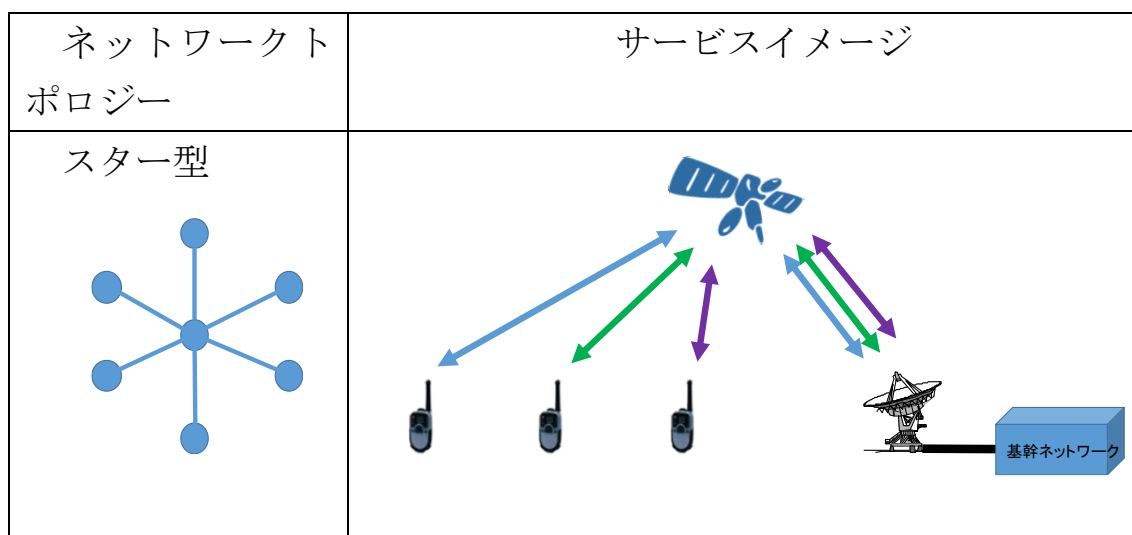


図 2.2-2 スター型のネットワークトポロジーと衛星移動体通信サービスのイメージ

上記移動体通信サービスでは、すべてのユーザリンクからのアップリンク信号をフィーダリンク局に送出しているが、共に衛星と接続している端末同士の通信は衛星で折り返すことによりフィーダリ

リンク通信容量を使用せずに通信（ワンホップ通信）できることから、フィーダリンク周波数帯域の有効利用となる。フィーダリンク局を介さずに端末同士が接続できる条件では、衛星移動体端末間では全接続型（Fully Connect 型）となる。図 2.2-3 に Fully Connect 型のネットワークトポロジーと衛星移動体通信サービスのイメージを示す。

衛星内で接続先の端末を確定するためには、交換部を再生中継方式にする必要がある。再生中継方式は、受信信号から宛先情報を読み取って経路選択を行う。超高速インターネット衛星（WINDS）では、信号の再生、経路選択を行うベースバンドスイッチを開発している[5]。

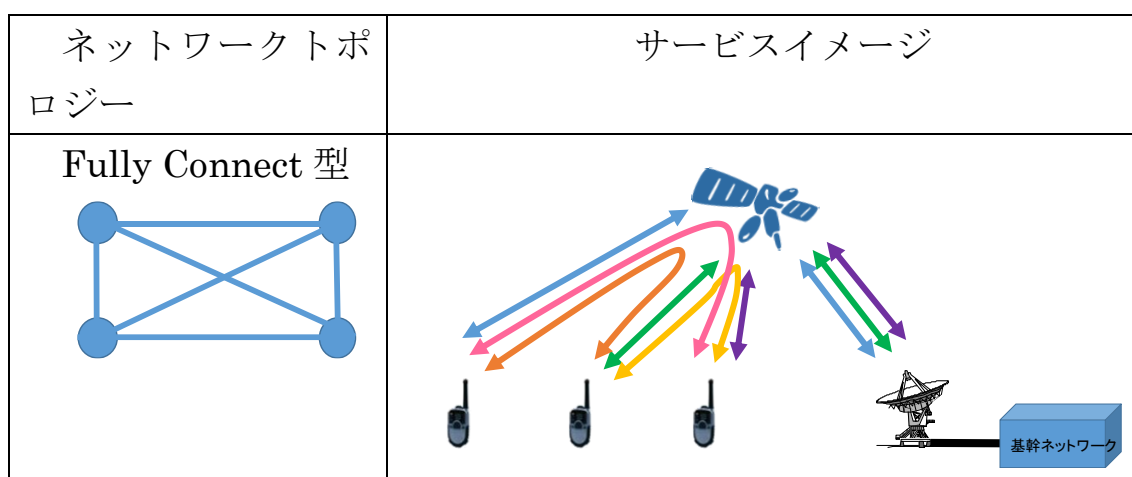


図 2.2-3 Fully Connect 型のネットワークトポロジーと衛星移動体通信サービスのイメージ

Fully Connect 型ネットワークトポロジーにおいて、通信したい局数が  $n$  あり、1 対 1 で通信する場合、その組み合わせは  $n(n-1)/2$  通りとなる。例えば 1000 端末にサービスを提供する場合は 499,500 のスイッチ切り替え機能が必要になる。衛星内ですべての組み合わせを実現できるスイッチネットワークを具備するのは衛星リソースの観点で困難であるが、デジタルチャネライザ技術の進歩により実現が可能となった。これについてはデジタルチャネライザの項で詳細を述べる。

## 2.2.2 衛星通信回線の成立性

衛星通信では伝送距離が地上に比較して長いため、伝搬路損失が非常に大きい。各種損失を加味しても通信回線が成立するよう設計しなければならない。成立性の確認では大きく 2 つの計算が必要である。ひとつは要求信号品質の算出である。もうひとつは要求信号品質に対する回線バジレットの算出である。以下にそれぞれの説明を示す。

### (1) 要求信号品質の算出

信号品質はビット誤り率(BER)で定義される。BER は送信したビット数に対して、受信側で受けたデータのエラービット数の割合を示している。図 2.2-4 にダウンリンクの BER 解析モデルを示す。衛星側で BER 特性を決める構成装置は主として変調器、ロールオフフィルタ、アンプ、フィルタである。位相空間上の信号点を示すコンスタレーション特性で評価したとき、各々の装置の振幅特性、位相特性により符号ユークリッド距離 (図 2.2-5 参照) の差が少なくなり BER が大きくなる。

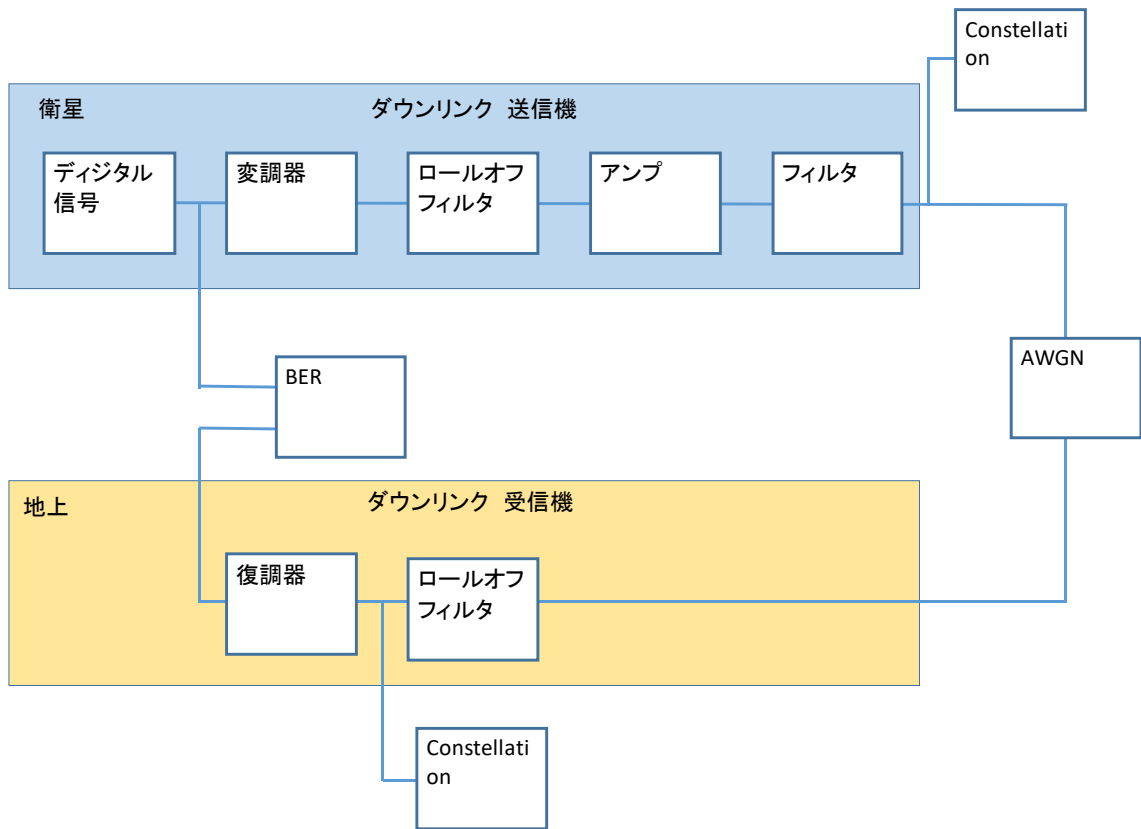


図 2.2-4 BER 解析モデル

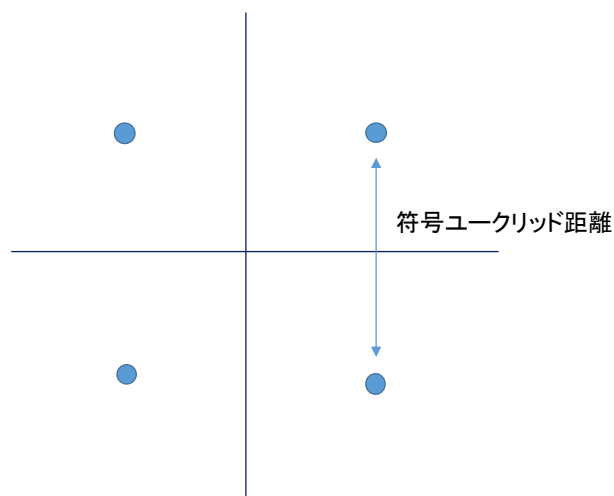


図 2.2-5 信号の位相空間コンスタレーション (QPSK)

理論値の BER に対して、解析モデルの BER 劣化量を算出する。  
BER 理論値 (QPSK) を P' とすると以下の式で  $E_b/N_0$  が算出できる。

$$P' = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{2N_0}} \right) \dots (式1)$$

$E_b/N_0$  は、1bit 当たりの信号エネルギー( $E_b$ )と 1Hz 当たりの雑音電力( $N_0$ ) の比である。 $C$  を信号電力、 $R$  をビットレート、 $B$  を信号帯域、 $N$  を信号帯域内雑音電力とすると、

$$E_b = \frac{C}{R} \dots (式2), \quad N_0 = \frac{N}{B} \dots (式3)$$

である。これより  $E_b/N_0$  は

$$E_b/N_0 = \frac{C \cdot B}{R \cdot N} \dots (式4)$$

ビットレートと信号帯域が等しい場合は

$$\frac{C}{N} = E_b/N_0 \dots (式5)$$

となる。

これにより要求信号品質を満足する信号電力が求められる。

## (2) 回線計算

衛星通信の回線計算とは信号電力・利得・雑音・干渉の強度を信号の流れに従って算出したものである。上記(1)から要求信号品質を満足する信号電力が求められているので、回線上に発生する電力損失

を補う利得、送信電力となるように算出要素の値を検討する。

図 2.2-6 に回線計算の算出要素を示す。本図ではダウンリンクの場合を示しているが、方向性などの条件が違ふものの、アップリンクにおいても算出要素は同じである。

**EIRP : (Effective Isotropic Radiated Power)** 送信側の性能を示す。

送信機の実出力電力とアンテナ利得の積によって求められる。

**送信ポインティング損失**：送信アンテナの指向ずれによる損失を示す。

**自由空間損失**：電波が空間を伝搬する際に生じる損失。伝搬距離に比例して増加し、波長に反比例して減少する。

**降雨減衰**：雨によって電波が減衰する量を示す。降雨量は地域によって差があるのでサービスする地域の降雨量と稼働率から求める。

**天空雑音温度劣化**：大気及び降雨からの熱雑音

**大気吸収損失**：大気に含まれる水蒸気分子による電磁波吸収による損失。

**フェージング損失**：マルチパスなどにより、位相差がある複数の信号を受信したときに発生する損失。

**偏波損失**：送受信アンテナの軸比のずれに基づく損失。

**交差偏波識別度劣化**：右旋円偏波と左旋円偏波を使用して別々の信号伝送をする場合において偏波識別度が劣化した際に生じる損失。

**受信ポインティング損失**：受信アンテナの指向ずれによる損失を示す。

**他システムからの干渉**：他の通信システムから到来した信号が干渉して発生する損失。

**G/T : (Gain to noise Temperature ratio)** 受信側の性能を示す。受信アンテナの利得とシステム雑音温度の比で求められる。

算出要素の値の利得は乗算、損失は除算し、回線計算を行い成立性を確認する。一般に数値はデシベルに変換して和、差で計算し、成立性の評価は 1Hz あたりの電力  $C/N_0$  (Carrier to Noise ratio、o は帯域を持たないことを示す) で行う。

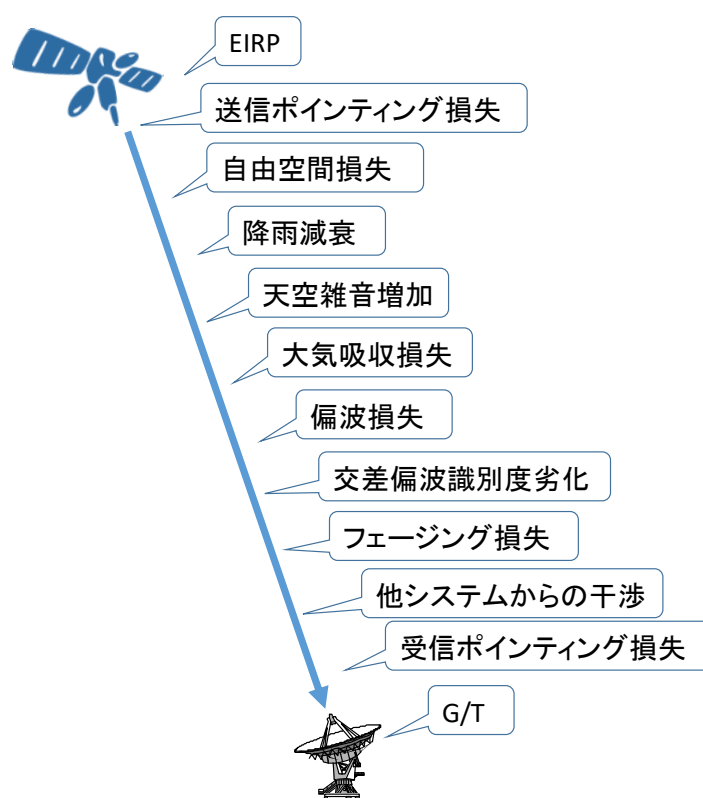


図 2.2-6 回線計算要素

### 2.2.3 衛星通信用周波数

衛星通信では無線による回線接続を行う。無線周波数は有限資源であることと、他国の通信と周波数干渉をする可能性があることから、国際電気通信連合無線セクター (ITU-R; International Telecommunication Union Radio Section) で周波数割り当ての管理が行われている。衛星通信サービスを行う場合は、ITU-R で定められた無線通信規則 (RR; Radio Regulation) の規約に従って実施する。国際的

な周波数分配について規定しているのは、RR 第 5 条である。RR 第 5 条では前世界を三つの地域に分けて規定している。RR では全世界を 3 つの region に分割して、各 region に周波数割り当てを定めている。日本は region III（主にアジア・太平洋地域、オセアニア等）に属している。ITU-R RR region 区分け図を図 2.2-7 に示す。

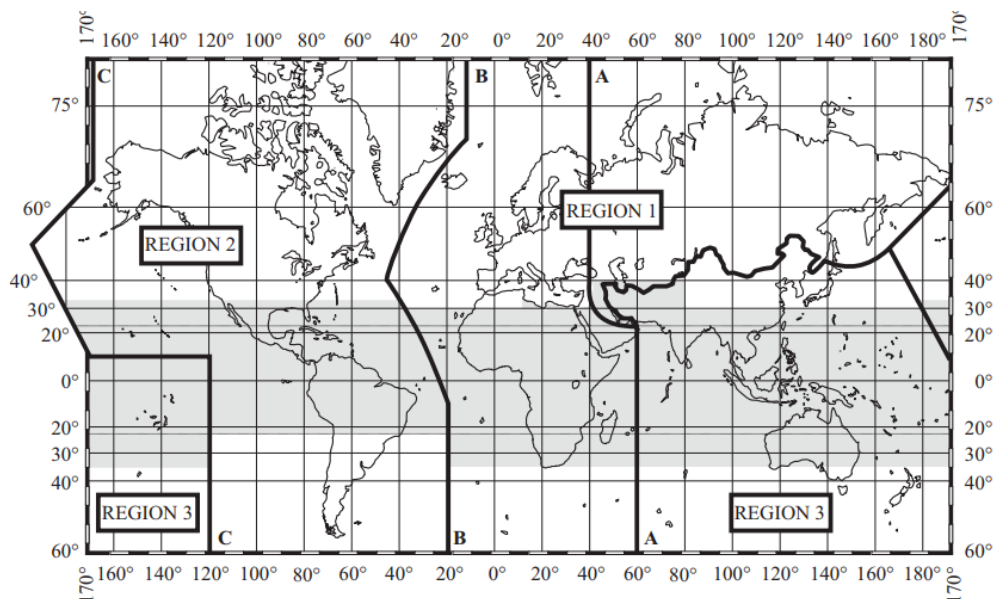


図 2.2-7 ITU-R Radio Regulations region 区分け図

RR では Table of Frequency Allocations として業務別に周波数帯を規定している。表 2.2-1 に本資料の抜粋を示す。

表 2.2-1 ITU-R Radio Regulations の Table of Allocations 抜粋



1 710-2 170 MHz

Allocation to services		
Region 1	Region 2	Region 3
<b>1 710-1 930</b>	FIXED MOBILE 5.384A 5.388A 5.388B 5.149 5.341 5.385 5.386 5.387 5.388	
<b>1 930-1 970</b> FIXED MOBILE 5.388A 5.388B  5.388	<b>1 930-1 970</b> FIXED MOBILE 5.388A 5.388B Mobile-satellite (Earth-to-space) 5.388	<b>1 930-1 970</b> FIXED MOBILE 5.388A 5.388B  5.388
<b>1 970-1 980</b>	FIXED MOBILE 5.388A 5.388B 5.388	
<b>1 980-2 010</b>	FIXED MOBILE MOBILE-SATELLITE (Earth-to-space) 5.351A 5.388 5.389A 5.389B 5.389F	
<b>2 010-2 025</b> FIXED MOBILE 5.388A 5.388B  5.388	<b>2 010-2 025</b> FIXED MOBILE MOBILE-SATELLITE (Earth-to-space)  5.388 5.389C 5.389E	<b>2 010-2 025</b> FIXED MOBILE 5.388A 5.388B  5.388

Table of Allocations で、衛星通信については固定業務と移動する移動体業務に区別されているため、移動体通信に使う場合は、宇宙業務の移動衛星業務として割り当てられた周波数枠から選択することになる。

新たに衛星通信サービスを行う場合は、ITU に申請をした上で、必要に応じて国際調整を実施する必要がある。事前公表資料（API ; Advance Publication Information）は衛星通信サービスを開始する 7 年前からなるべく 3 年前までに提出する必要がある。他国は有害な干渉の恐れがある場合は意見の申立を行う。他国から意見の申立があった場合は、申立て国と国際調整を行う。調整をする場合は、既にサービスを行っている側が優先であり、既存サービスに有害な干渉等の悪影響を与えてはならない。

このように新たに衛星通信サービスを行う場合は、無線周波数獲得のためには、多くの手続きと時間を要する。API 提出前に隣接周波

数をサービス地域で他国が使用していないか十分調査することが必要である。

衛星通信に必要な周波数帯域はリソース限界があり、使用可能な周波数帯域を有効活用する必要がある。STICS では IMT-2000 バンドと呼ばれる帯域を使用することを想定している。

IMT-2000 とは、ITU が 2000 年を目標に標準化を進め、策定された第 3 世代携帯電話の規格である。世界各国で異なる周波数帯や方式で運用されている携帯電話システムを同じ周波数帯、同じ方式で運用することにより、国際ローミングの容易な実現、端末及び設備などのコスト削減を目的としている。IMT-2000 バンドとして移動体衛星通信システムに 1980MHz～2010MHz 及び 2170～2200MHz の帯域を用いることができる。衛星通信サービスではこの周波数資源をできる限り効率よく利用することが重要となる。周波数の有効活用としては、一つ周波数枠に出来るだけ多くの情報量を詰め込むこと、多くのユーザを取り込めること、空き時間を減らすことなどがあり、変調方式や多重化によって実現できる。

#### 2.2.4 衛星通信システム容量

衛星質量の上限は、ロケットの搭載能力で決まっている。また、衛星には衛星自体を運用するためのバス機器を搭載する必要があるので、衛星通信に使用する通信機器に割り振られる質量はさらに少ない。このため、地上システムと比較すると衛星の通信容量は非常に少ない。これは通信機器に供給できる電力についても同様に言えることである。近年 HTS (High Throughput Satellite) というカテゴリで、大規模、大発生電力、大通信容量の衛星が実用化されつつある。これは衛星規模が大きいのに加え、姿勢制御などに使用するスラスタをイオンエンジンに置き換えることでスラスタに推力を供給するガスを充てんしたタンクの搭載をしないことにより、通信システムに割り当てられる質量を増やす技術が用いられている。

## 2.2.5 周波数分割接続方式

多元接続方式としては、地上移動体通信では、大ユーザ数化、大通信容量化の要求に技術の進歩が伴って次々と新しい通信方式が開発されている。しかし静止衛星による移動体通信では、衛星から電波を出力する増幅器の出力電力の限界や衛星－地上間の伝搬遅延時間から大容量の多元接続方式の採用は難しく、STICS では FDMA 方式の採用を前提としている。FDMA 方式では、周波数軸でチャンネルを分割し、細分化されたチャンネル（周波数スロット）を各ユーザ端末に専有的に割り当てる。無線システムに割り当てられた周波数帯域内において、チャンネルは周波数軸上で複数の周波数スロットに分割されるが、このとき隣接する周波数スロット同士が互いに干渉しないように、一定の周波数帯域幅がガードバンドとして設定される。図 2.2-8 に FDMA のチャンネル配置イメージを示す。

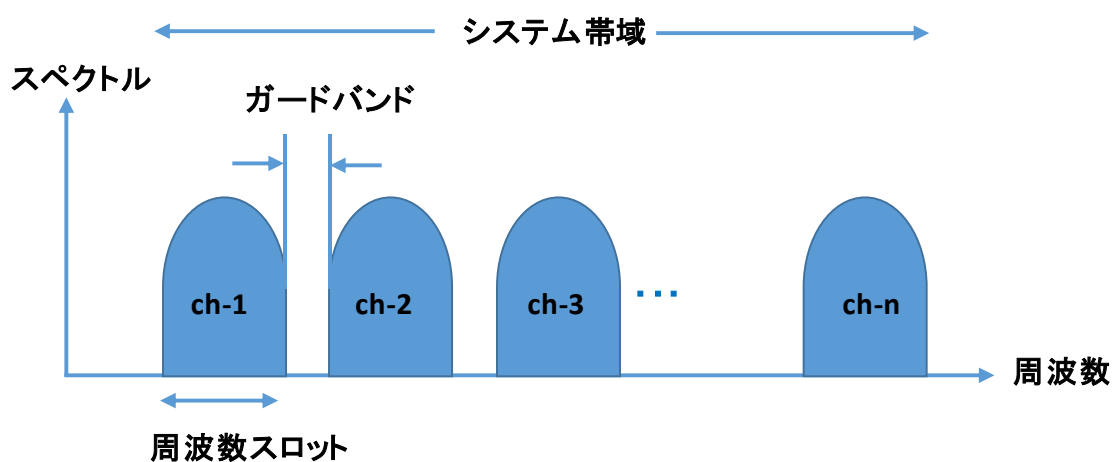


図 2.2-8 FDMA チャンネル配置イメージ

FDMA 方式は音声通話を目的とした自動車電話や衛星移動通信、船舶通信などで利用されてきた。これらは 1 ユーザがチャンネルを占有するのではなく、呼が発生するごとに回線を設定するデマンドアサインメント方式と呼ばれる。ユーザが通信を始めることを発呼、通信を終了させることを終話、通信している時間を呼の保留時間という。図 2.2-9 にユーザの通信イメージを示す。このうちユーザが利用し

ていない部分はリソースを使い切れていないことになるので、周波数利用率が低下してしまう。この対策についてはチャネライザで詳細を説明する。

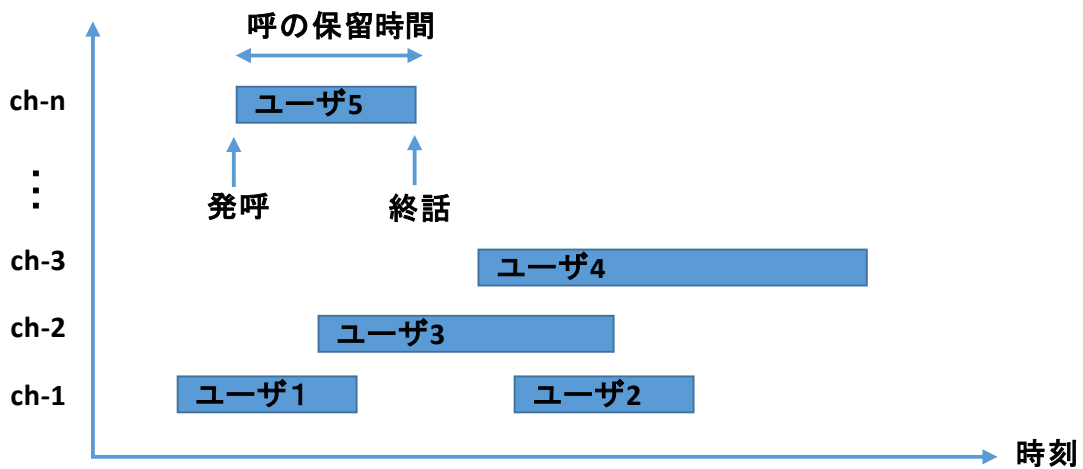


図 2.2-9 FDMA 通信イメージ

## 2.2.6 周波数再利用

サービスする空間をセルと呼ばれる小ゾーンに分けて、セルごとに周波数を割り当てる方式をセルラー方式と呼ぶ。各セルラーの中心には一つの基地局が配置される。隣接するセル同士は、周波数干渉を防止するために違う周波数を使用する。しかし距離が離れたセルでは、パスロスによる影響により、再度同じ周波数を使用することができる。これを周波数再利用と呼ぶ。再利用回数が増えればユーザ収容数を増やすことができる。

図 2.2-10 に周波数再利用の例を示す。クラスタ 1 のセル 1 とクラスタ 2 のセル 1 では空間距離  $d$  だけ離れている。このときの自由空間損失は次式で与えられる。

$$L = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \cdots \text{(式 6)}$$

ここで、 $\lambda$  は信号の波長

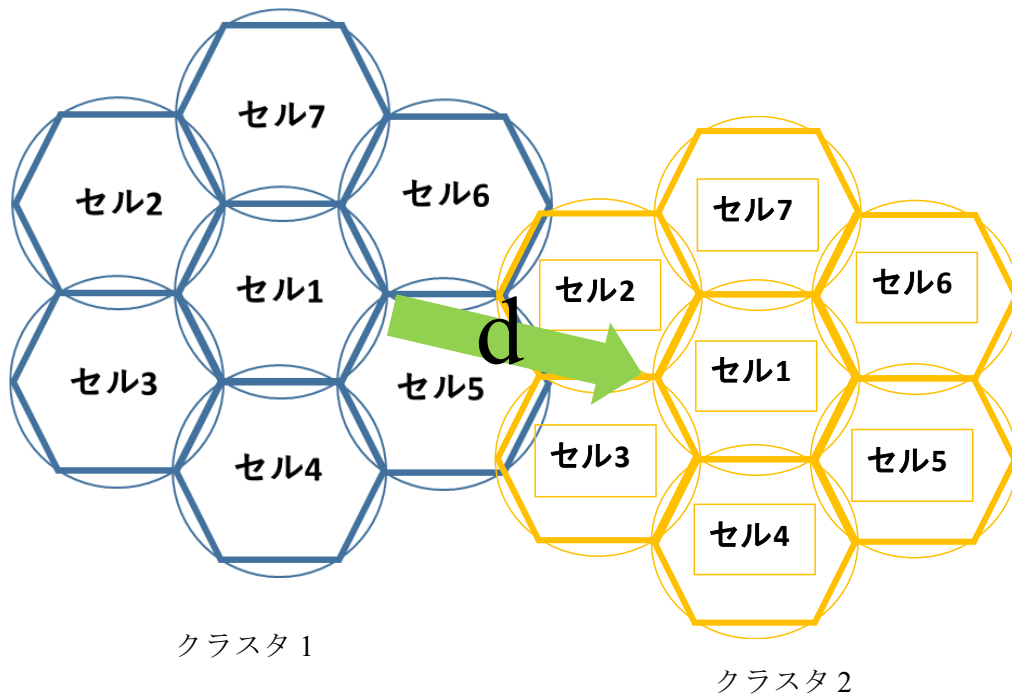


図 2.2-10 地上システム 周波数再利用の例

更に伝搬路に遮蔽物がある場合の損失は大きくなる。cost231-Hataモデルでは損失は次式で与えられる[6]。

$$L = 46.3 + 33.9 \log f - 13.82 \log h_B - a(h_R, f) + [44.9 - 6.55 \log h_B] \log d + C \cdots \text{(式7)}$$

ここで

$L$  は損失[dB]

$f$  は周波数 単位は[MHz]

$h_B$  は地上局アンテナの高さ[m]

$d$  は距離[km]

$h_R$  は端末の地上からの高さ[m]

$a(h_R)$  は秦モデルアーバンエリアの端末高さ修正項で以下により与えられる。

$$a(h_R, f) = (1.1 \log f - 0.7)h_R - (1.56 \log f - 0.8) \cdot \cdot \cdot \text{(式8)}$$

$C$  は街区の修正項で中等度の市街地では 0dB, 大都市では 3dB とする。

伝搬損失により、他のクラスタからの信号が十分低下するようにセルの大きさとクラスタ構成を設定することによりクラスタの数だけ周波数を再利用したことになる。

クラスタ構成にした場合、システムに割り当てられた帯域幅を  $W_{sys}$ 、チャンネルの帯域を  $f_{ch}$ 、クラスタ構成のセル数を  $L$  とすると、セルに割り当てられるチャンネル数  $N$  は、

$$N = \frac{W_{sys}}{f_{ch} \cdot L} \cdot \cdot \cdot \text{(式9)}$$

で与えられる。

衛星システムの場合は、衛星ビームのアンテナ利得特性がアンテナボアサイト方向からの離角によって干渉量が算出される。図 2.2-11 に衛星システムの周波数再利用のための隣接ビーム干渉量のイメージを示す。クラスタ A の衛星ビーム 1 とクラスタ B の衛星ビーム 1 で同じ周波数を使用している別クラスタの同じ衛星ビーム番号である。クラスタ A の衛星ビームのクラスタ B 方向へのアンテナ利得は、アンテナボアサイト方向からの離角分だけ低下する。希望波に対する干渉波の電力比が十分小さければ、クラスタ A とクラスタ B で周波数再利用可能となる。回線計算の結果では、干渉側のアンテナパターンのサイドローブ極大値を結ぶ包絡線が、被干渉アンテナビーム端(EOC: Edge of Coverage)で 30dB 以上あれば、干渉信号の寄与はほぼ無くなる。

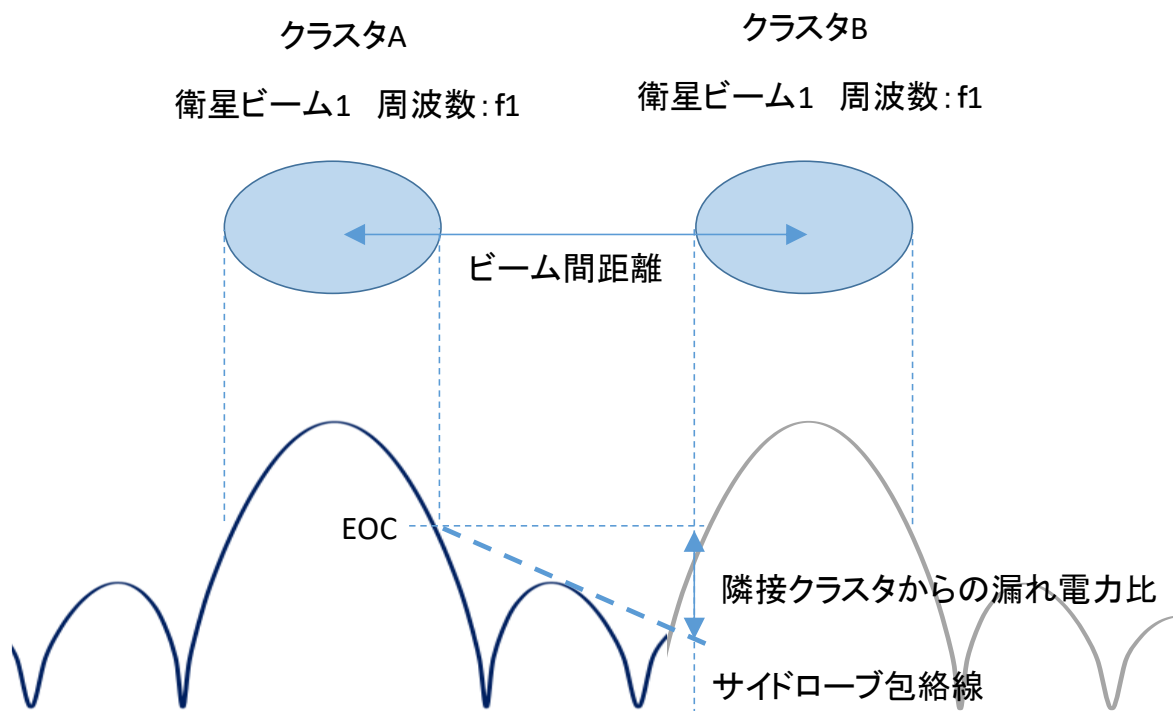


図 2.2-11 衛星システム 周波数再利用のための隣接ビームの干渉量

### 2.2.7 デジタルビームフォーミング

静止軌道から日本国土に衛星放送する場合は、1つの反射鏡と給電用ホーンで日本の主要な国土を覆うビームにする。反射鏡は国内主要地点で十分な利得を確保し、近隣国に信号が漏れないよう鏡面を成型したものが設計される。離島などのために反射鏡と給電用ホーンの組み合わせを数個増やすことはできるが、衛星の地球面側の実装面積の制約から反射鏡枚数には物理的限界がある。多チャンネル化する場合は、衛星ビームを増やす施策として、マルチビームアンテナを使用する。マルチビームアンテナは、一つのアンテナから複数のビームを放射することができる。インテルサット V 号では、1枚の反射鏡に対して88本の給電用ホーン群となるフィードクラスタを搭載し、88個のマルチビームを形成している[7]。

アンテナは、給電用ホーンを放物面反射鏡の焦点位置にするが、フ



ードクラスタ方式では、給電ホーンを放物面の軸に垂直な面内で焦点からずらして配置する。このずれ量に応じてビームは放物面の中心軸からずれた角度方向に出る。ただし給電用ホーンの焦点からのずれ量が大きくなると、焦点がずれて、ビーム幅が広がり特性が劣化する。マルチビームアンテナは、アンテナ構成要素のうち、重量、体積とも、もっともかさばる反射鏡部分を共通化することで搭載性を確保している。

給電用ホーンの代わりに放射素子をアレー状に配置し、位相合成によってビームを形成するアレー形式では、放射素子と中継器の間にバトラーマトリックスやフェーズシフターなどのビーム形成回路を接続することにより、接続するビーム形成回路端子に応じて異なる方向にビームを出すことができる。位相調整をアナログ (RF) 信号で行なう方法は、アナログビームフォーミングと呼ぶ。位相特性は計装などの信号路の長さによって変化するため、全ルートで同じ位相となるように製品アセンブリ段階で調整する必要がある。

デジタルビームフォーミング (DBF) は、デジタル信号を信号処理で位相/振幅制御を行うことで位相合わせの困難さを軽減できる。デジタルビームフォーミングの基本構成を図 2.2-12 に示す。DBF にて位相/振幅制御したベースバンド信号を DAC にてアナログ変換し、IF 信号とする。次に周波数変換器で RF 帯にアップコンバートした後、素子より出力する。アンプは信号電力を増幅するために使用する。

計装などの信号路長さによる位相のずれ量は、最初に測定して DBF 演算に初期値として組み込んでおけば、その後は意識する必要がない。

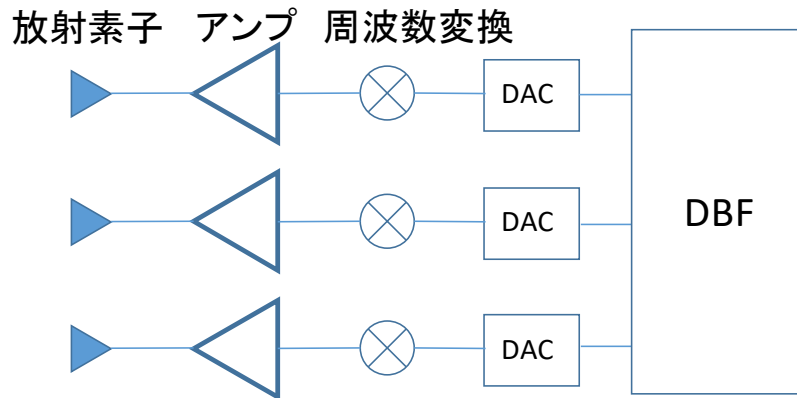


図 2.2-12 デジタルビームフォーミングの基本構成

デジタルビームフォーミングを利用することでそのアンテナの指向性を制御し、特定の方向に電波を集中的に送信することにより、他ビームとの干渉を軽減することができる。

マルチビームによる衛星移動体通信では、隣接したクラスタへのアンテナサイドローブ特性による干渉量が周波数再利用において重要であるため、デジタルビームフォーマを採用することにより、周波数利用効率が高くなる。

### 2.2.8 デジタルチャネライザ

デジタルチャネライザとは、受信した広帯域の信号をデジタルフィルタを使用してチャンネルごとに分割する機器をいう。また、帯域分割した信号をデジタル処理をして、任意の順序で周波数軸上に並び替える機能も含めてデジタルチャネライザと呼ぶこともある。図 2.2-13 にチャネライザ機能イメージを示す。

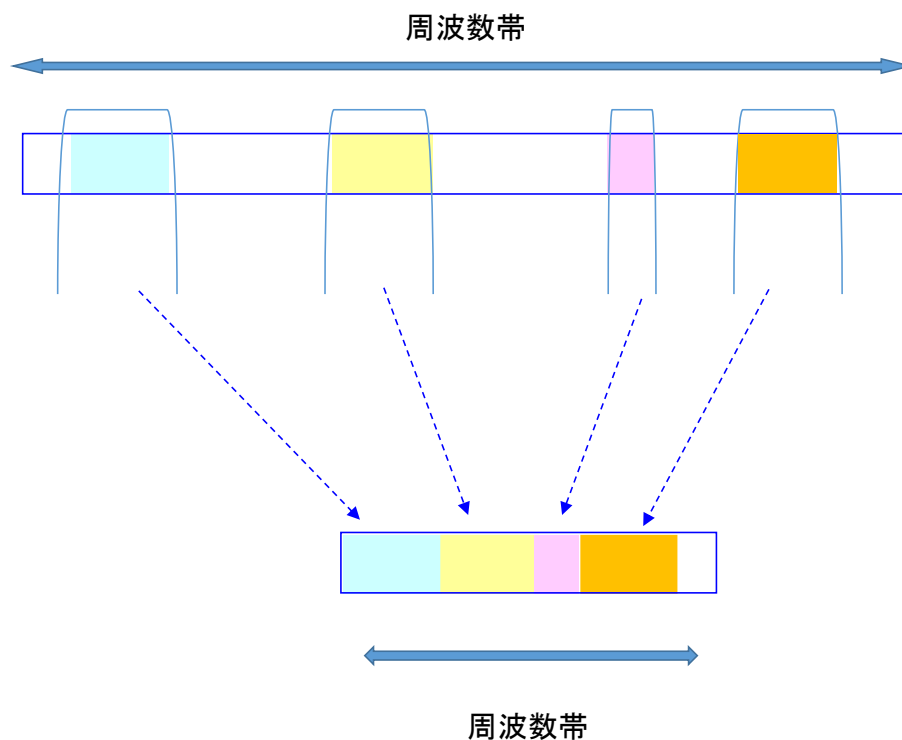


図 2.2-13 チャネライザ機能

デジタルチャネライザは、周波数交換をする際に使用している帯域のみ取り出すことができるので周波数利用率向上に有効である。ここで周波数利用率は以下の式で求めることとする。

$$\text{周波数利用率} = \frac{\text{総使用帯域幅}}{\text{全体帯域幅}} \dots (\text{式10})$$

衛星にデジタルチャネライザを搭載すれば空間的、時間的に変動する衛星ビームエリアの発呼に対応して、各衛星ビームに動的に必要なチャンネル帯域幅を割り当てることができるので、周波数利用率が向上する[8]。

### 2.2.8.1 周波数交換

衛星内で通信のあて先を変更して、通信をしたい端末同士を接続するには、交換技術を使用して双方の回線を接続する必要がある。交換方式を大きく分類すると、回線交換方式と蓄積交換方式となる。回線交換とは、二つの端末間の伝送路を、銅線をつなげるように交換機が順次接続していく方式である。蓄積交換は、送信端末からの情報を交換機がいったんメモリに蓄積し、情報にあるあて先を見て、宛先に向かう伝送路に情報を転送することにより、順次宛先まで届ける方式である。

衛星移動体通信において、音声通信を前提とする場合は、伝送遅延がほとんどない回線交換方式が望ましい。また、蓄積交換を実現する場合は衛星内に宛先を判別する再生交換処理を実装しなければならない。

衛星を利用した通信サービスでは、衛星－地上間の通信は無線で行われるため、多元接続方式を FDMA にして、フィーダリンクとユーザリンクの周波数変換をする際に周波数分割スイッチ方式を採用すると親和性が高い。衛星内に信号チャネルに応じた出力増幅器（TWTA(Traveling Wave Tube Amplifier)や SSPA(Solid State Power Amplifier)) が選択できるように物理スイッチを組み合わせたスイッチマトリックスを具備することにより出力先を変えることができる。

更にデジタル信号をデジタルフィルタによって周波数分割したのち交換先周波数帯に変換するデジタルチャネライザにすることにより物理的なスイッチによる実装限界やルート数限界を意識せずに交換が可能となる。

#### 2.2.8.2 ベントパイプ方式とチャネライザ方式

フィーダリンク局からアップリンクされた信号を衛星で受信したのち、ダウンリンクする処理において、衛星内で信号処理をしない方式をベントパイプ方式と呼ぶ。周波数変換や増幅といった高周波アナログ処理のみを実施するので、比較的簡便な装置となる。これに対

して、衛星で受信した信号を AD 変換してデジタル処理を行う方式がある。

衛星搭載用デジタルデバイスは、宇宙環境では太陽からの放射線が直接入射するため耐放射線強度が高いものに限られる。高性能なデジタル装置を衛星に搭載することは、相応に難易度が上がることになる。

衛星内で受信した信号を復調して、信号内の情報からダウンリンクの経路や相手先を特定する方式を再生交換方式という。再生交換方式は、高機能なデジタル処理となり衛星リソースを多く使用する。

デジタルチャネライザ方式はチャンネル割当をする処理をデジタル化することで、再生交換よりも比較的低位リソースで周波数有効利用が見込まれる。

デジタルチャネライザを衛星に搭載することにより、従来のベントパイプ方式に比べて周波数を有効利用することができる。

図 2.2-14 に示す通りベントパイプ方式ではユーザリンク帯域の合計と同じだけのフィーダリンク帯域が必要であるが、デジタルチャネライザで使用中の帯域のみ選択して伝送することにより周波数利用率を高くできる。

マルチビームによる移動体衛星通信では、ユーザリンク周波数帯は、周波数再利用するのでフィーダリンク周波数帯より広がるので、デジタルチャネライザ方式により、フィーダリンク周波数帯の周波数利用率を改善が見込まれる。

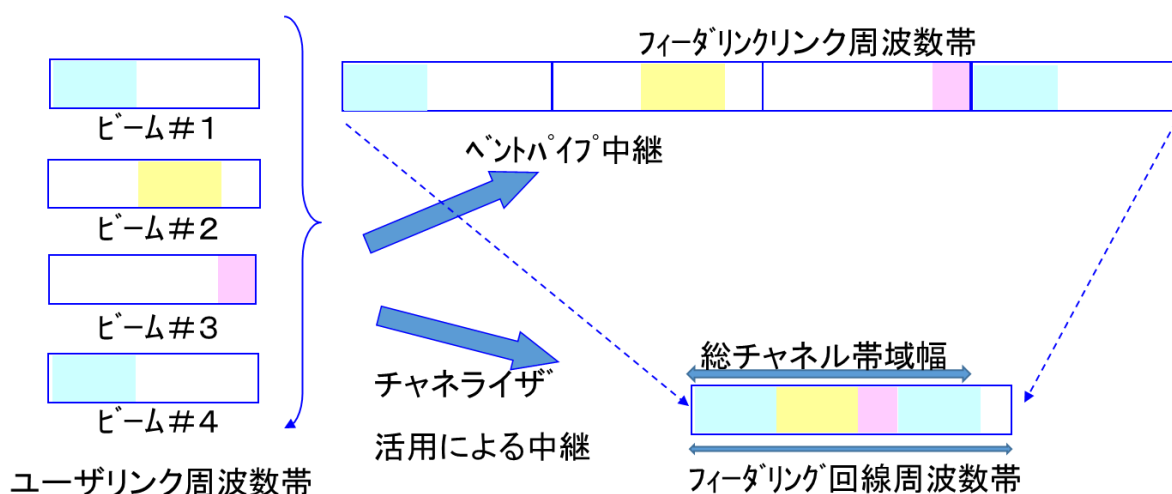


図 2.2-14 デジタルチャネライザ効果イメージ

さらに、デジタルチャネライザはそのトラフィック変動に対する柔軟性の高さから衛星移動通信システムへの応用が注目されている。従来の衛星通信ではあらかじめ計画されている通信先にスイッチマトリックスを使用して地上からのコマンドで接続経路を設定する方法が行われている。スイッチマトリックスは衛星搭載装置で、受信した通信信号を多段で構成されたスイッチ群を使用して所望の出力先に経路接続する機能を持つ。しかし移動体通信では、通信端末の発呼要求が計画的に行われるわけではないのでスイッチマトリックスを使った接続計画に基づく回線設定が出来ない。また、衛星を使用した移動体通信サービスを行うには、端末の移動に伴うビーム間のハンドオーバーに際し、衛星機上で自動的に各ビームの割当周波数帯域を再配置し、移行先のビームでも同じ周波数帯域を端末に割当てる機能が不可欠である。衛星を使用した移動体通信サービスをする際に、従来のシステムと比較してデジタルチャネライザを採用することにより通信容量が10%から30%に増大出来るという試算がある[8]。

これらデジタルチャネライザを移動体通信用の衛星に搭載した場合の利点から、近年、衛星にデジタルチャネライザを搭載することへの高まりがあり、米国では WGS (Wideband Gapfiller Satellite) に Ka バンドと X バンドの移動体通信ミッションを搭載し、おおよそ 1700 台の MIST (Multiband Integrated Satellite Terminal) 端末の通信サービスを行う予定である[9]。STICS 衛星においても周波数有効利用、呼量変動の対応からベントパイプ方式やスイッチマトリックス方式ではなくデジタルチャネライザを搭載する。

### 2.2.8.3 デジタルフィルタ

衛星搭載用デジタルデバイスは、耐放射線強度の関係から地上で使用されているデジタルデバイスと比較すると低速なデバイスに限られる。このため周波数分割をするためのフィルタは送受信を行う帯域もしくはベースバンドとの間に処理用の中間周波数帯を設けて実施していた。しかし宇宙で使用可能な高速デジタルデバイスが増えてきたことからベースバンドでデジタルフィルタ処理が可能になってきた。

FPGA(field-programmable gate array)は設計者が構成を任意に設定できる集積回路である。衛星搭載用機器は、地上の量産品とは対極の少量特注品であるため、ASIC(application specific integrated circuit)ではなく FPGA が使用されることが多い。現在使用される高速な FPGA としては XILINX 社の Vertex-5QV でクロック周波数は 550MHz である。

デジタルフィルタはこれらデジタルデバイスに FFT(Fast Fourier Transform)などのデジタル信号処理をプログラミングすることで実装される。デジタルフィルタを使用するメリットとしてアナログフィルタと比較して小さく、高周波特有のインピーダンスマッチングなどの処理が不要となる。またプログラミングによりフィルタパラメータを変更できるので調整が容易なことなどがあげられる。しかし最も特徴的なのは急峻な瀟波特性が得られることである。この特性により 2 つのチャンネル間で発生する漏話を防ぐための

ガードバンド幅を小さくすることができる。この結果、割り当て帯域幅を無駄なく使用できるので周波数利用率が高いシステムを構築できるのである。

FIR(Finite Impulse Response)デジタルフィルタは、

$$y[n] = \sum_{m=0}^{m=N} h_m x[n - m] \cdots \text{(式11)}$$

で表すことができる。

多数のデジタルフィルタを構成する場合は、フィルタバンクを採用することにより回路規模を抑えることができる。図 2.2-15 に M 分割チャネルフィルタバンクブロック図を示す。ダウンサンプリングやアップサンプリングを組み合わせたマルチレート処理を組み合わせ、元のインパルス応答を 1 サンプルずつシフトしながら M 番目ごとのサンプルを取り出すポリフェーズ構造で表される。

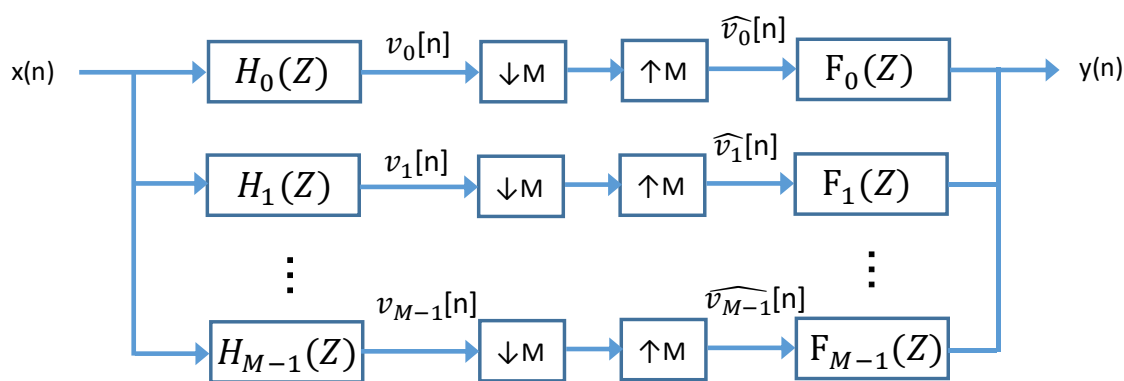


図 2.2-15 M 分割チャネルフィルタバンク

M 分割チャネルフィルタバンクは下記式で表現されインパルス応答  $h_0[n]$  を持つ低域フィルタである。

$$H_0(z) = \sum_{n=0}^{\infty} h_0[n] z^{-n} \cdots \text{(式12)}$$



通過帯域  $\omega_p$ 、阻止帯域  $\omega_s$  で  $\omega_p < \pi/M < \omega_s$  となる整数  $M$  において

$$\begin{aligned}
 H_k(z) &= \sum_{n=0}^{\infty} h_k[n]z^{-n} = \sum_{n=0}^{\infty} h_0[n](zW_M^k)^{-n} \\
 &= H_0(zW_M^k) \quad k=0, 1, \dots, M-1 \quad \dots \text{(式 13)}
 \end{aligned}$$

となる伝達関数で表すことができる。

デジタルチャネライザはこのような高機能デジタルフィルタと入出力回路の組み合わせから成る。衛星搭載デジタルチャネライザはフィルタパラメータを地上のコマンドで変更することにより任意の帯域幅や分割数に再構成できるので空間的、時間的に変動するトラヒックに対して最適な周波数利用+が可能である。

## 第3章 STICS と呼受入制御

### 3.1 STICS

STICS に使用する衛星は大型展開アンテナを搭載し、日本及び排他的経済水域を 100 程度のマルチビームで覆う。このマルチビームは周波数繰り返しにより周波数の有効利用を行う。文献[1]では STICS の通信諸元を表 3.1-1 の通り示している。

表 3.1-1 STICS 通信諸元表

項目		内容
サービス		携帯端末による音声通信
		可搬端末によるデータ通信
通信速度		音声：10kbit/s 程度
		データ：64kbit/s~10Mbit/s
周波数	ユーザリンク	MSS(*)周波数上り：1980MHz～2010MHz
		MSS(*)周波数下り：2170MHz～2200MHz
	フィーダリンク	Ku:上り 14GHz/下り 12GHz
サービスエリア		日本、周辺海域及びアジア諸国

(\*)MSS: Mobile Satellite Service/移動衛星通信サービス

STICS では、ユーザリンクとして各端末と衛星を接続し、フィーダリンクとしてフィーダリンク局と衛星を接続する。ユーザリンクは

衛星移動体通信用に確保されている S バンドを使用する。S バンドは降雨減衰の影響を受けにくく回線の信頼性が高いことや、地上移動体通信システムで使用している周波数帯と近いため、端末開発の容易さが期待できる。フィーダリンクは固定局との衛星通信に使用できる Ku バンドを使用する。

また、衛星ミッション機器用テレメトリ・コマンド運用回線を介して他のミッション機器とともに運用される。衛星ミッション機器用テレメトリ・コマンド運用回線はフィーダリンク局と衛星とを接続する。端末との接続は必要ないので Ku 帯あるいは Ka 帯での運用が可能である。

図 3.1-1 に STICS のリンクイメージを示す。

STICS では、デジタルチャネライザを搭載し、フィーダリンクとユーザリンクの周波数交換を行う。再生中継は実施しないため、2 ホップ型の通信を行う。

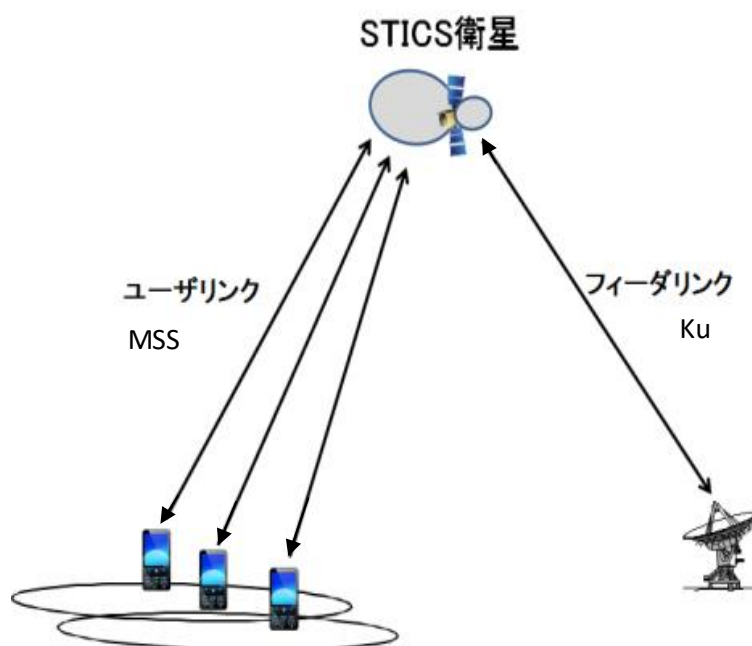


図 3.1-1 STICS の衛星リンクイメージ

回線計算は[1]で表 3.1-2 の通り示されている。STICS 衛星は、電

気開口径 30m の大型展開アンテナを搭載してアンテナ利得 47dBi、EIRP 69dBW、G/T 20.9dB/K の諸元を有し、10kbit/s の音声通信について回線計算の実現性について報告されている。

最も厳しい回線はリターンリンクの携帯 (端末) から衛星へのアップリンクである。この回線は、端末のアンテナ利得が見込めず 0dBi であること、送信電力が 0.2W と微弱であることからである。送信電力が微弱である理由は、電波法の人体への比吸収率 (SAR) により上限があること、送信電力を上げると端末のバッテリー消耗が激しく、長時間の通信ができないことがある。

最も厳しいこのアップリンク回線は、 $C/N_0$  が 47.9dB Hz に対して、ダウンリンク回線は 61.1dB Hz と 13dB 以上の差があることからリターンリンクの総合  $C/N_0$  はアップリンク回線の性能が支配的であることを示している。

表 3.1-2 STICS 衛星の回線計算表

項目	単位	フォワード		リターン	
		地→衛	衛→携	携→衛	衛→地
送信系					
送信周波数	GHz	14.0	2.0	2.0	12.0
送信電力	W	0.001	0.2	0.2	0.001
TX アンテナ口径	m	5.0	30.0	-	2.0
TX アンテナ利得	dBi	54.7	47.0	0.0	45.4
EIRP	dBm	53.7	69.0	22.0	44.4
伝搬系					
自由空間損	dB	206.5	189.6	189.6	205.2
降雨減衰	dB	3.0	0.0	3.0	0.0
フェージング損	dB	0.0	3.0	0.0	3.0
受信系					
RX アンテナ口径	m	2.0	-	30.0	5.0
RX アンテナ利得	dBi	46.7	0.0	47.0	53.4
G/T	dB/K	19.1	-23.8	20.9	27.3
C/No	dB-Hz	60.9	50.2	47.9	61.1
復調系					
受信 C/No	dB-Hz	-	49.9	-	47.7
データレート	kbit/s	-	9.6	-	9.6
所要 C/No	dB-Hz	-	46.5	-	46.5
回線マージン	dB	-	3.4	-	1.1

地→衛：地上から衛星への通信，衛→携：衛星から携帯端末への通信，携→衛：携帯端末から衛星への通信，衛→地：衛星から地上への通信

STICS 衛星では、日本上空の静止軌道上に配置し、約 100 個の衛星ビームで日本国土・領海及び EEZ をカバーする計画である。図 3.1-2 に衛星ビーム配置図を示す。STICS 衛星は直径 30m 程度の大型アンテナを有することで地上の携帯端末であっても通信可能な EIRP を確保する。このため既存の衛星携帯電話と比較して小さい端末で実現が可能となる。

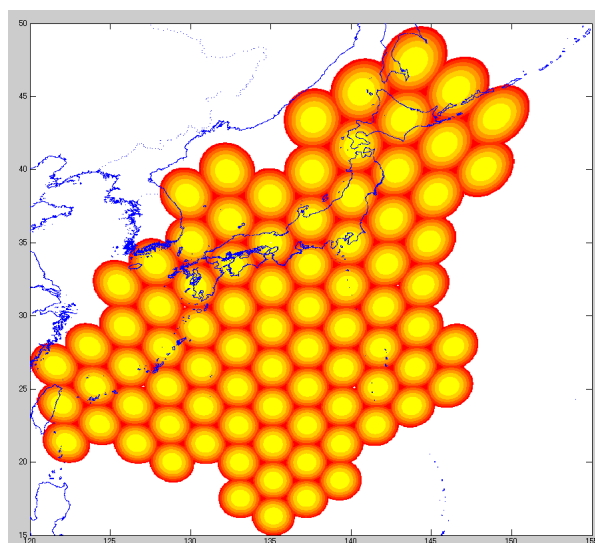


図 3.1-2 STICS 衛星ビーム配置図

STICS 衛星はデジタルビームフォーマを搭載しており、任意のエリアに衛星ビームを形成することができる。このため大規模災害時には衛星ビームの照射位置を被災地に向け、災害地域ではないエリアには衛星ビームの照射を行わないことにより、衛星リソースを被災地域の通信に集中することができる。これは従来の通信衛星には無い新規機能となる。

ユーザリンク周波数は移動衛星業務に割り当てられた 2GHz 帯(上り 1980-2010MHz、下り 2170-2200MHz) を想定しており、これは既存の地上携帯電話システムで使用している周波数帯に近い。このため STICS の端末は、既存の地上携帯電話の端末と親和性が高く開発しやすい。

### 3.1.1 STICS の利用イメージ

STICS の利用イメージとしては大きく 2 つある。一つはデジタルデバイス対策、もう一つは大規模災害時における情報インフラである。日本は太平洋側に広い排他的経済水域（EEZ）を有しており、領土、領海、EEZ を合計した大きさでは世界第 9 位になる。領土の大きさだけでの順位が 62 位であることから領海と EEZ の広さが際立っていることがわかる。これら海域において、漁船や客船など従来からある通信需要の他、今後海洋資源探査、安全保障分野などで通信需要は高まっていくことが考えられる。しかし海域では既存の地上通信システムは使用できないので、日常使用している携帯端末では通信できない。専用の移動体衛星通信システムを利用すれば可能であるが、専用端末が必要で費用も高いことから既存の携帯端末を持つような手軽さは無い。

山岳地域、人里から離れた地域、離島といった場所では、地上システムの不感地帯となり、遭難、事故等の連絡手段が取れない問題がある。STICS では静止衛星軌道上から日本をカバーするため、地上基地局の設置性に関与しない点で地上通信システムを補完する意義を持つ。

もう一つ STICS に期待されるのが大規模災害時の通信手段である。東日本大震災は近年類を見ない大災害であると同時に移動体通信システムが災害時の重要な通信インフラであることを改めて実感させた。そして更に基地局の倒壊、津波による損壊、電力供給断による停止などにより通信できない状況や輻輳により通信不可状態が続くなど被災地域での移動体通信システムの弱さも気付かされる結果となった。衛星は地震などの災害を直接受けないため、市民等への的確な災害情報の伝達や迅速な救援活動等に不可欠な情報通信インフラとして利用可能な対災害に優れた通信システムである。災害時における通信手段として確保することは生活の安心・安全に大きく関与す

る。図 3.1-3 に STICS の利用イメージを示す。

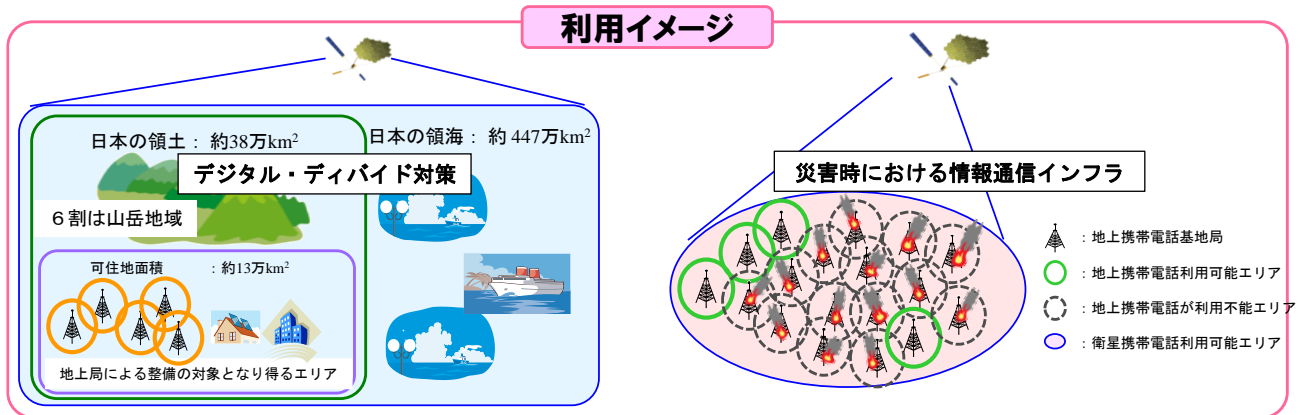


図 3.1-3 利用イメージ

### 3.1.2 新規性

#### (1) 周波数有効利用

STICS では衛星と地上で周波数を共用する。既存の衛星移動体通信は衛星を利用した通信専用の周波数帯域を使用する。これに対して STICS では同じ周波数帯を地上と衛星両者で使用する[13]。

地上の移動体通信システムではセルラーシステムを使用している。これは地域をクラスタ構成にして同じ周波数帯を使用する。同じ周波数帯を使っている地域同士は、電波干渉が十分低い状態になるよう空間的に分離することにより周波数帯の再利用が可能となる。

衛星システムでは、同じように衛星ビームをクラスタ構成にするが、地上システムとの違いは電波の伝搬損失ではなく、衛星ビームのアンテナ利得の低下分である。アンテナ利得はアンテナボアサイト方向に利得最大となるように設計するが、アンテナボアサイト方向からの離角が大きくなるとアンテナ利得は低下していく。これにより被干渉地域で同じ周波数の干渉が十分小さければ周波数の再利用が可能となる。

さらに、STICS ではこの周波数を地上と衛星で共用する。この仕組みを以下に説明する。衛星システムでは、7つの隣接した衛星ビーム



(セル) を 1 つのクラスタとする。すなわちクラスタ構成 7 のクラスタ配置である。図 3.1-4 にクラスタ構成を示す。

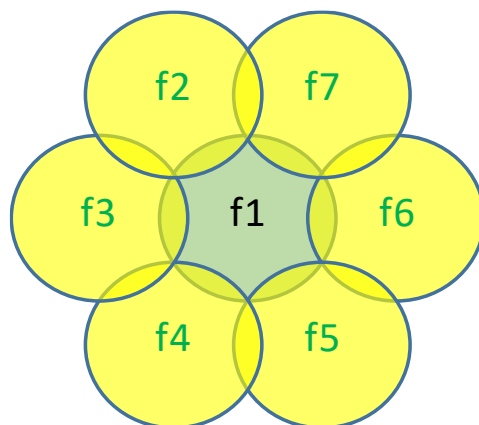


図 3.1-4 クラスタ構成

横軸を周波数として使用する帯域を示すイメージを図 3.1-5 に示す。図 3.1-4 の f1 のエリアでは、衛星との通信を図 3.1-5 の f1 の周波数で実施することとする。すると f2~f7 の周波数はこのエリアでは使用されていないので地上システムで使用できる。同様に f2 のエリアでは衛星との通信を f2 の周波数で実施し、f1、f3~f7 を地上システムで使用する。

### 衛星システム



### 地上システム



図 3.1-5 周波数帯域使用イメージ

ただし、f1 のエリアを衛星通信としたとき、f2~f7 エリアのうち f1 エリアと重なっているかまたは近傍では衛星通信用に割り当てた周波数帯からの干渉が十分下がる離隔距離 (空間ガードバンド) を確保する必要がある[14]。このように割り当て周波数帯域を地上と衛星

で共用して使用する。あとは、このクラスター単位でサービスエリアを覆えば周波数干渉はない。

衛星と地上を同一周波数帯で利用するシステムは米国では、Ligado SkyTerra で L バンド帯 [11]、ヨーロッパでは Eutelsat 10A、 EchoStar XXI で S バンド帯 [12]で実運用されている。日本国内ではまだ実用例はない。

## (2) 大型展開アンテナ

既存の移動端末の無線通信性能としては静止軌道上にある衛星と通信を行えるほどの十分な能力は無い。それは衛星までの距離が 36000km と極端に遠いことにより信号電力が減衰してしまうためである。これに対する技術的な対策として STICS 衛星に大型展開アンテナを搭載することを想定している。地上から衛星へのアップリンク回線を検討する上で地上側が大きなアンテナを持つ基地局ではなく、携帯可能な移動端末にするためには携帯端末からの出力電力を上げるか衛星アンテナの利得を上げるかという選択になる。しかし携帯端末の出力電力を大きくすると電波法の人体への比吸収率 (SAR) による上限の規定があるため必然的に衛星のアンテナ利得を上げる方策が取られる。パラボラ型アンテナの利得は直径の 2 乗に比例して増加するため、直径の大きい大型アンテナを搭載させることになる。展開型の大型アンテナを搭載した衛星は SkyTerra (アンテナ直径 22m)、TereStar (アンテナ直径 18m) の実績がある。STICS ではアンテナ直径 30m、アンテナ利得 47dBi を想定している。マルチビームを形成する大型展開アンテナでは、各ビームのエッジの利得 (EOC) を高くし、かつ他ビームへの干渉を小さくすること工夫が必要になる[15]。

## (3) 日本領土・領海および排他的経済水域をカバーする衛星ビー

ム

DBF 技術は電波の位相と振幅をデジタル的に変化させることにより、任意の方向にアンテナの放射パターンを形成する装置である。

デジタルチャネライザは周波数領域でチャンネルの再配置を FFT とデジタルフィルタ技術で行う装置である。この二つのデジタル技術を使うことにより、日本領土・領海および EEZ をカバーする衛星ビームを形成し、各衛星ビームで発生する呼の要求を効率的に接続することができる。図 3.1-2 に衛星ビーム配置例を示す。

### 3.1.3 衛星通信と既存地上通信との接続

衛星通信は衛星内での信号処理として、周波数変換のみを行う非再生型と受信した信号を一度復調し、デジタル信号処理を行った上で送信する再生型の 2 種類に大別することが出来る。

再生型では衛星軌道上で誤り訂正が出来るため、誤りが発生する通信路が半分になることから、通信速度を上げられるメリットがあるが、反面多くのデメリットがある。特に問題なのが通信方式の急速な進化に対応できない点である。地上通信システムでは 1985 年の第一世代から 30 年あまりで第 3.5 世代、第 4 世代といった新しい通信方式に変遷している。通常、衛星は開発に 5~7 年、軌道上での運用期間 15 年程度を想定しているため、開発当初に最新の通信方式を取り入れたとしても運用期間半ばには技術が陳腐化して地上通信システムとの接続に支障をきたすと考えられる。このため、STICS 衛星では非再生型の方式を採用するのがよい。ユーザからの通信は衛星内では復調処理は施さずそのままフィーダリンク局にダウンリンクする。フィーダリンク局と地上通信システムとの間にゲートウェイ局を設け地上システムとの通信方式の変換処理を行う。

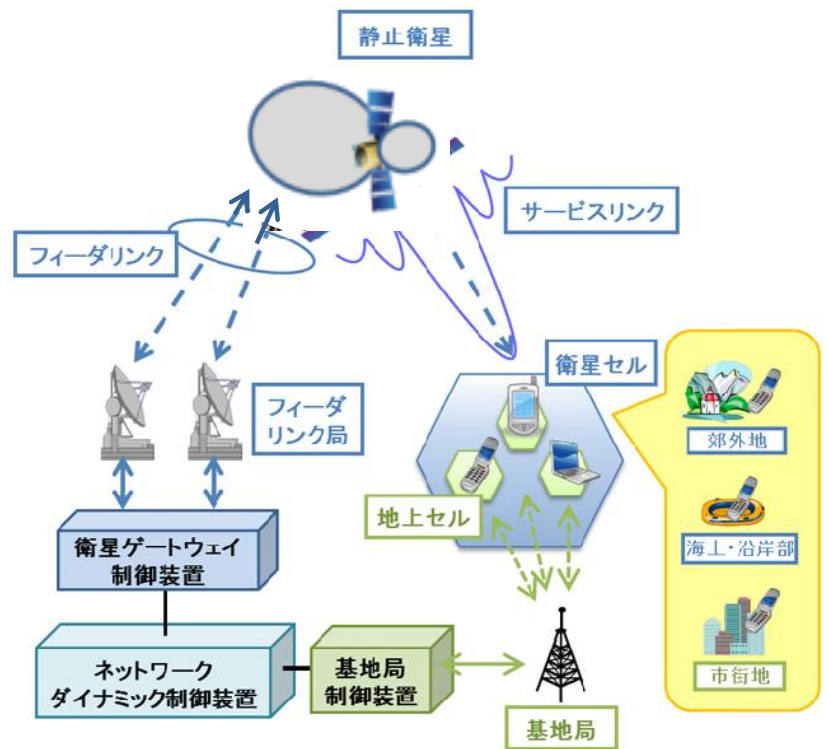


図 3.1-6 衛星通信と既存地上通信との接続イメージ図

また衛星通信は地上通信システムと比較して通信容量が極端に小さいことから、衛星リソースを効果的に使用する技術が必要で、ネットワークダイナミック制御装置によって最適化される。これらの衛星通信と既存地上通信との接続についてイメージ図を図 3.1-6 に示す。

## 3.2 呼受入制御

輻輳回避などの理由から通信要求を受け付けられない制御を呼受入制御という。制御はトラヒック状態を監視している NOC (Network Operation Center) で実施あるいは実施指示が行われる。

無線通信を使用したアクセス制御は、大きく 2 つの方式に分類される。ひとつがアクセスクラス制御方式。もうひとつが、RRC CONNECTION REJECT 方式である。それぞれ制御を行う機器が、端末と基地局という違いがある。

この他に通信方式の効率的な運用を目的に行われる呼受入制御として WCDMA において基地局送信電力の急激な変動による通信容量損失をさけるために、即時性を要求しない通信を判別し、急激な変動が起こらないように送信順序を変える研究が行われている[16]。

マルチビームを使用する衛星通信では、文献[17]において、衛星ビーム内のユーザ数に応じてビームごとの出力電力を制御をする SE-CAC(SINR Evolution technique CAC)により効率的な衛星電力リソース利用を提案している。

### 3.2.1 大規模災害時の通信状況

東日本大震災は 2011 年 3 月 11 日 14:46 に発生した。

入江らによる東日本大震災におけるトラヒックの変化を示したデータ[18]によると、発信呼数が震災発生前の 12.6 倍に急増している。このとき発信規制をしていたため、実際の発信呼数は、平時の 60 倍発生したことがわかっている。一般に平時における 1 端末が生起する呼量は 0.015erl とされている [38]。この 60 倍の発呼があったということは、0.9erl の呼量が生起したことになる。1 回線が 1 端末に使用され続ける場合、1.0erl であるので、端末の 0.9 が発呼し、これを呼損なく満たすためには全端末数の 90% の回線数が必要であることを示している。

東日本大震災発生後、深夜になるに従い、通信要求数が減少し、輻輳が沈静化した。当日の 23 時頃には平時と同レベルに下がっている。しかしこれはユーザが通信する必要がなくなったのではなく、通信を諦め、就寝したためと考えられる。翌朝は 3 時頃から発信呼数が上がり始め、早朝 6 時頃には平時の約 3.5 倍になっている。多くの人が、通信できず不安な夜を過ごしたのちに未明から再呼を行ったと思われる。

東日本大震災では発信呼数急増による輻輳以外にも通信状況を悪くする要因が発生した。それは基地局の機能不全である。地震による倒壊のほか、津波による損壊、電力供給断による機能停止などがそれ

である。基地局が機能不全となった場合は端末側に問題がなくても通信できない状態となってしまう。

### 3.2.2 災害時の輻輳と規制制御

東日本大震災時の輻輳状況から、災害時の輻輳回避について研究や提案がされている。戸花らの電話予約制御方式の提案 [19]では、災害地域への呼を一度、受け付けるシステム (RCS) が接続して、空き回線ができると RCS 側からかけ直す制御により再呼を減らす提案がされている。また、浅野らによる最短通話優先方式の提案[20]では、発信者があらかじめ通話時間を登録し、その通話時間が短い登録件を優先的に接続することで平均待ち時間を減らす提案がされている。これに対して地上携帯電話システムではアクセスクラス制御が導入されている。

無線通信を使用したアクセス制御は、大きく 2 つの方式に分類される。ひとつがアクセスクラス制御方式である。これは端末側で行う制御である。端末側であらかじめ送信しようとしている制御信号の種別を識別し、その判定によって接続要求信号の規制制御を決定する方式である。もうひとつが、RRC CONNECTION REJECT 方式である。これは基地局側で行う制御である。基地局において、端末より受信した信号を識別し、個別に信号送信抑止の信号 (RRC CONNECTION REJECT)を送信する方式である。

LTE では、基地局から常に報知情報を配信している。報知情報は、端末における位置登録要否の判断に必要な位置登録エリア番号、周辺セル情報とそのセルへの在圏するための電波品質等の情報、および発信規制制御を行うための情報などを含み、セルごとに一斉に同報されるものである。アクセスクラス制御方式は、この報知情報に制御情報を設定してトラヒック制御を発動する方式である。これにより各端末からの発信時に接続要求信号の規制制御を行うことから、ネットワークへの処理負荷を与えない点が利点である。アクセスクラス制御では、端末ごとに割り振られたアクセスクラスとして

の番号により、接続要求信号の送信（アテンプト）を許可するか否かを制御する。受け入れを規制する場合はネットワークから端末への報知情報にアクセスクラスで識別された規制情報が入れられ、その内容と端末の持つアクセスクラスとを比較することにより、端末自身がアテンプトを許可するか否かを判定する。アクセスクラスは一般の端末には 0~9 の番号が、緊急通報（110 番、118 番、119 番）に 10 が、公共機関、保全業務など特殊な端末には 11~15 が割り当てられている[21]。アクセスクラス制御は、輻輳の恐れがある場合に、呼受入制御を実施して、輻輳を回避し、公共安全用の通信要求を確保するために、一般端末からの通信を制御する。

現アクセスクラス制御では一度通信成功した端末であっても、次の通信要求の成功確率は同じであるので、再度通信要求をして成功することもある。

このように一度も通話成功しない端末と複数回成功する端末が出現することも起こる。災害時においては多くのユーザが救助要請や、安否確認といった緊急性の高い通話を行うことから通話成功の公平性が重要と考える。

3GPP Release 13 ではアプリケーション単位のアクセスクラス制御（ACDC ; Access Control for general Data Connectivity）が検討されている[22]。ACDC では、端末内部にアプリケーションをカテゴリ分けした情報を保持し、ネットワークからは、各アプリケーションカテゴリに対する規制の情報が報知情報で通知される端末はその情報から、アプリケーションが通信接続要求を出した際に、そのアプリケーションが属するカテゴリの規制情報を見て、接続するか、規制するかを判断する方式である。これによりサービスの種別に応じた、より細かい粒度でのアクセス制御が可能となる。

新しいアクセスクラス制御が検討される中で、過去 1 時間以内に通話成功した端末、あるいは短時間に再呼を繰り返している端末といった各端末の挙動に対してアクセスクラスを設けて通話の重要度

が高い端末を選択していく処理も可能と考える。



# 第4章 衛星のチャネライザの運用制御による高効率トラヒック制御

デジタルチャネライザは、ユーザリンクのチャンネルとフィーダリンクのチャンネルを交換する機能を持つ。デジタルチャネライザの効率的な運用は周波数の有効利用となると同時にトラヒックフローの極大化につながる。チャネライザ運用制御による高効率トラヒック制御を検討した。

## 4.1 概要

STICS 衛星は衛星ビームと帯域幅を任意に変更できるデジタルビームフォーマとデジタルチャネライザを搭載する予定であり、災害時には被災地域に衛星リソースを集中する運用を想定している。このような衛星ミッション運用やデジタルチャネライザの運用方法について研究した例がない。サブバンド幅の検討はチャネライザ運用方法の基本的な条件であるがこれについても研究した例はない。

本章では、衛星システムの通信を高効率化する対策として、SITCS 衛星に搭載予定のデジタルチャネライザの運用方法について検討を行った内容を示す。

デジタルチャネライザは衛星ミッション機器用テレメトリ・コマンド運用回線を介して他のミッション機器とともに運用される。

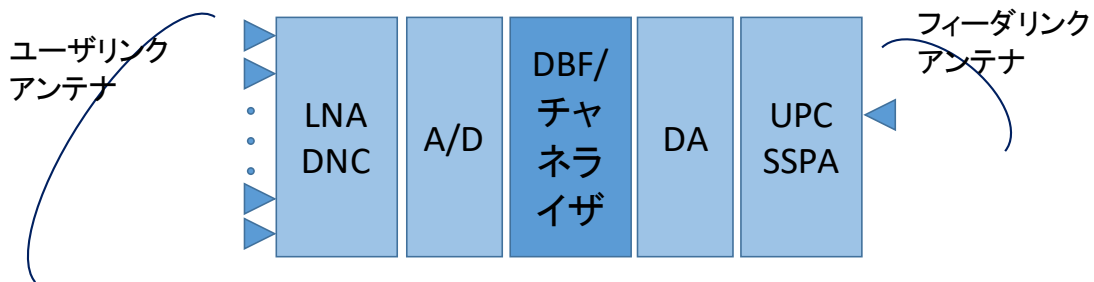
衛星ミッション機器用テレメトリ・コマンド運用回線はフィーダリンク局と衛星とを接続する。端末との接続は必要ないので Ku 帯あるいは Ka 帯での運用が可能である。この回線を使用して衛星ビームごとの周波数帯域を変更できる。平時では衛星ビームごとの平均的な呼量から帯域割り当てを行い、帯域幅の組み換えは実施しない。災害時は平時の運用を一時的に取りやめ、被災地域の空間的位置と通信要求を加味して衛星ビーム配置と帯域幅を設定する。

デジタルチャネライザは、ビームごとの帯域幅を任意に変更可能であるが、デジタル回路規模と搭載性から、周波数チャンネル交換を 1 チャンネル単位ではなく、チャンネルを数個まとめたサブバンド単位で行う必要がある。また、チャンネル交換の最小単位となるサブバンド幅は、チャネライザ内の最大演算量を決定づけるため、軌道上で変更はできない。このため運用条件を想定したうえでシステム開発段階で確定する必要がある。

## 4.2 STICS 衛星チャンネル交換部

STICS システムは地震などによる大規模災害時に長期間の停電などにより地上の基地局が利用できないときなどに活躍が期待される。被災地のビームエリアでは、安否確認等により呼量が急増する。この時、他のビームに割り当てられていた周波数帯域を被災地ビームへ割当て、呼量の急増に柔軟に対応することが必要となるため、衛星にデジタルチャネライザを搭載する予定である。図 4.2-1 に STICS 衛星ミッションブロックイメージを示す。

ユーザリンクからの信号を受信したのち A/D にてデジタル信号に変換する。デジタルチャネライザで任意のチャンネルに変換を行う。そしてアナログ変換、フィーダリンク周波数変換したのちフィーダリンク局へダウンリンクする



LNA : Low Noise Amplifier

DNC : Down Converter

A/D : Analog-Digital converter

DBF : Digital Beam Former

DA : Digital-Analog converter

UPC : UP Converter

SSPA : Solid State Power Amplifier

図 4.2-1 STICS 衛星ミッションブロックイメージ

チャネライザの帯域幅の適正な割り当てについては、Jain らが独自の指標を使用した研究[23]をしている。Bisio らはこの研究を衛星通信の条件に拡張して検討したうえ、更に他の指標を用いて適正割り当ての研究をしている[24]。Cocco らは、マルチビーム衛星の運用条件を想定して、具体的な通信トラヒック条件で、上記指標を用いて、適正な割り当ての研究をしている[25]。

STICS に搭載予定のデジタルチャネライザは端末からの信号であるユーザリンクをチャンネルが複数個まとめられたチャンネル群であるサブバンドごとに信号を分割したのち、別の周波数帯に任意の順番に再配置する機能を有している。再配置された信号は、制御局に送信するフィーダリンクとして衛星から出力される。ここでチャンネルではなく、サブバンド単位で処理を行う理由はサブバンド単位での処理の方が、デジタルチャネライザの回路規模を小さくできるからである[2]。衛星搭載機器は重量・電力・寸法に制限があり、常に搭載性が要求される。

文献[25]では、衛星リソースの有限性に着目して、トラヒック要求

が変化したとき、衛星出力電力と帯域幅を可変とし、最適な条件を導く研究がされている。この研究ではチャンネルの帯域幅は 31.25MHz とし、これを最小の帯域分解能としている。STICS では、音声通信サービスも行うことを想定しているため、チャンネル幅はこれより小さく設定する必要がある。このため、STICS では処理はチャンネルではなく、サブバンド単位で実施することになる。

サブバンド単位にし、サブバンドに包含されるチャンネル数を多くすることで回路規模が小さくなり搭載性を高くすることができる。しかし、チャンネル単位で割当てていくと発呼要求に細かく対応出来るため周波数利用率が高くなるが、サブバンド単位だと空いているチャンネルもサブバンドの中に含まれることがあり、サブバンド幅が大きいと空チャンネルが含まれる確率が高くなり周波数利用率が低くなる。すなわちサブバンド幅の大きさ決定するには周波数有効利用と衛星搭載性という相反するテーマから最適値を探す必要がある。チャネライザにおけるサブバンド幅の研究については、周波数分割したのち、次段の信号処理に合わせて任意の帯域幅に再合成する提案[26]はなされているが、衛星搭載性を加味してサブバンド幅の最適値を求めようとする研究は見当たらない。そこで、本節では衛星搭載用デジタルチャネライザのサブバンド幅を検討した結果を述べる。

まず、課題の整理のため各衛星ビームの呼量が均一条件について実施し、フィーダリンク帯域幅とユーザリンク帯域幅が大きく寄与することを示す。次に大規模災害時を想定した衛星ビーム呼量の不均一条件の場合には被災地ビームを含むクラスタのユーザリンク帯域幅に着目する必要性を示し、その最適なサブバンド幅の導出までを行う。

STICS 衛星に搭載するデジタルチャネライザに焦点を絞り、その特徴について述べる。さらに本研究のモチベーションとなるサブバンド検討の意義について試作品の結果からハードウェアの性能ターゲットについて述べる。次に呼量均一条件での検討を示し、課題の整理と呼量均一条件での最適サブバンド幅導出について述べる。さ

らに大規模災害時を想定した呼量不均一条件において、チャンネル収容数の概念を使用して最適サブバンド幅導出を述べる。

#### 4.2.1 SITCS 運用条件を想定したチャネライザとサブバンド幅への要求

STICS はマルチビーム衛星を使用した移動体通信システムで、ユーザリンク周波数は移動衛星業務に割り当てられた 2GHz 帯（上り 1980-2010MHz, 下り 2170-2200MHz）を想定している[10]。およそ 100 ある衛星ビームは隣接する 7 ビームを 1 クラスタとして同一周波数帯域を繰り返し割当て、周波数の有効利用を行う計画になっている。このため STICS においてデジタルチャネライザが有効と考えられる。STICS に搭載するデジタルチャネライザの持つべき特徴をまとめると、以下の通りとなる。

- (1)日本国土・領海・EEZ を含む海上など広範囲の移動体通信サービスエリアを想定し、そのエリアをおおよそ 100 個程度の衛星ビームで覆うことになる。各衛星ビームエリアの端末から任意の時間に呼接続要求が発せられる。このため常に呼量変動を有する条件に対応する機能が必要となる。
- (2)STICS では衛星ビームをクラスタ構成とし、同じ周波数を繰り返し使用する。30MHz を 7 ビーム 1 クラスタとして運用する場合、1 ビーム当たりの帯域幅は 4.28MHz となる。衛星ビームの照射地域を正 6 角形とし 7 ビームにより 1 クラスタを構成し、クラスタ単位で各ビームに同じ周波数を使用しても、同じ周波数が割当てられるビームは空間的に離れるため周波数干渉を回避できる。衛星ビーム配置をクラスタ化することによりユーザリンク帯域を再利用している。但し、クラスタ化することにより周波数干渉を空間的に回避しているので衛星ビームごとに帯域幅に変化をつけることはできない。必然的に同じ帯域幅となり、上記の例では 1 ビームのユーザリンク帯域幅は 4.28MHz とな

る。

(3)大規模災害時等で地上携帯電話ネットワークの多くの基地局が停波する状態になった時、地上の携帯電話ネットワークを補完する重要な役割が期待されている。また、大規模災害時には家族や知人などへの安否確認などにより被災地ビームエリアへの呼量が急増することもあり、予測不能な呼量の集中に柔軟な帯域割り当てが出来る能力が要求される。

(4)平時の STICS 運用条件ではユーザリンクは既存の通信と同様に常に帯域すべてを使っていない状況が平時の運用条件となる。そのため総ユーザリンク帯域幅と同じフィードリンク帯域幅は必要無い。使用しているチャンネルだけをフィードリンクに変換する。この条件ではフィードリンクの使用していないチャンネル数を最小化することが周波数有効利用となる。これに対して大規模災害時は、被災地域の通信要求が特に多く、被災地域の他の地域の通信要求よりも優先することにする。この場合、被災地域を含むクラスタに割り当てられたユーザリンクの使用していないチャンネル数を最小化することが周波数有効利用となる。1クラスタの照射範囲は被災地に比較して十分大きいので被災地を含むクラスタ内では多くの通信要求に応じるため帯域を広げるビームとその分狭めるビームを特定して限られたユーザリンクを効率的に使用することが必要である。

(5)衛星に搭載することから、重量・寸法・消費電力が衛星リソースの範囲内であること。サブバンド幅は、周波数交換機能の最小帯域幅を決定することから、チャネライザの回路規模を決定することになる。サブバンド幅は衛星の設計段階で確定しておく必要があることから、あらかじめ運用条件まで含めて検討しなければならない。

#### 4.2.2 サブバンド検討の必要性

STICS では、1 ビームあたり 4.28MHz のユーザリンク帯域幅とし、

全部で 100 衛星ビームを配置することからフィーダリンク帯域幅は最大 428MHz 必要になるが、平時ではユーザリンク帯域幅をすべて使い切るほどの呼量は無いためフィーダリンクはこれより少ない帯域幅でよい。そして効率良くフィーダリンク帯域にチャネライジングすることが必要である。また、災害等トラヒックの偏りが大きい条件では被災地を含むクラスタのユーザリンク帯域幅の上限に達することになるため、各ビームへの帯域割り当てにより効率が変わる。そしてこの際にサブバンド幅の違いによりその効率が変わる。

STICS 衛星搭載用デジタルチャネライザはハードウェアの要素技術開発のため試作を実施している[13][27]。この試作品はユーザリンク帯域幅 32 MHz, フィーダリンク帯域幅 256MHz, サブバンド幅 250 kHz で製作された。試作品の寸法は W180 mm×D276 mm×H300 mm, 質量 8.6kg, 消費電力 180W であった(受信 DBF/チャネライザ)。しかし本試作品の構成は 16 素子であり、最終的に衛星に搭載する装置の構成は 127 素子であることから、素子構成として 8 倍の規模が必要になる。このときの消費電力見込みは送受合わせて 2600W とあるが、衛星リソース配分案[28]では消費電力 1300W であり 2 倍の開きがある。サブバンド幅を本試作条件より大きくすることにより回路規模を小さくし、消費電力を低減することができる。本試作のサブバンド幅 250kHz を 2 倍の 500kHz にすることによりチャネライザのチャンネル間隔も 2 倍となり FPGA 数は約半分で済むことになる。すなわち衛星搭載性を加味するとサブバンド幅は 500kHz 以上で周波数利用率が高い値を求めることが必要である。

### 4.2.3 呼量均一条件での検討

ユーザリンクとフィーダリンクの周波数交換は、ユーザリンクからフィーダリンクとフィーダリンクからユーザリンクの 2 種類のルートがある。マルチビームを使用した移動体衛星通信では、ユーザリンク帯域幅よりフィーダリンク帯域幅の方が狭いことから、フィーダリンクからユーザリンクのルートはチャネライザによる周波数利

用率向上にはつながらない。ここではユーザリンクからフィーダリンクの周波数交換の場合について検討する。

各ビームの呼量が均一の場合のデジタルチャネライザ（以降、単にチャネライザと記述する。）の効果について、サブバンド幅を変化させて周波数利用率の計算を実施したところ、サブバンド幅が大きくなるのにしたがって周波数利用率が単調低下するわけではなく、サブバンド幅が大きくても周波数利用率が高くなる場合があることがわかった。尚、FDMA ではチャンネルの使用量が周波数利用率となることから、周波数利用率は以下の計算式で求めた。

$$\begin{aligned} \text{周波数利用率} &= \frac{\text{総使用帯域幅}}{\text{全体帯域幅}} \\ &= \frac{\text{総使用チャンネル数}}{\text{収容可能チャンネル数}} \dots (\text{式14}) \end{aligned}$$

サービス地域の呼量が多く、空きチャンネルにすぐ通話要求の呼が入るトラヒック状態を想定したとき、ユーザリンクおよびフィーダリンク帯域のチャンネルは常に使用中であると言える。このような条件であれば各帯域に収容できるチャンネル数は計算することができる。

ユーザリンク帯域幅上限から決まるチャンネル総数をユーザリンク収容チャンネル数と呼ぶこととする。

全体のユーザリンクに入るチャンネル数は1衛星ビームに入るチャンネル数の衛星ビーム数倍となる。また、1衛星ビームの帯域幅は全体のユーザリンク帯域幅を周波数繰り返し数で除した値が割り当てられる。

以上からユーザリンク収容チャンネル数は以下の式より求められる。



ユーザリンク収容チャンネル数 ( $N_{user\_ch}$ )

$$= N_{beam} \times \left[ \frac{BW_{user}}{N_{color}} \times \frac{1}{BW_{sub-band}} \right] \times \left[ \frac{BW_{sub-band}}{BW_{ch}} \right] \quad \dots (式 15)$$

$BW_{user}$  : ユーザリンク周波数帯域幅

$BW_{sub-band}$  : サブバンド幅

$BW_{ch}$  : チャンネル幅

$N_{beam}$  : 衛星ビーム数

$N_{color}$  : 周波数繰り返し数

注 [ ]: ガウス記号

(式1) で使用した記号の物理的イメージ図を図 4.2-2 に示す。フィーダリンクについても同様に収容チャンネル数を検討する。フィーダリンク帯域幅上限から決まるチャンネル総数をフィーダリンク帯域幅収容チャンネル数と呼ぶこととするとフィーダリンク収容チャンネル数は以下の式より求められる。

フィーダリンク収容チャンネル数 ( $N_{feeder\_ch}$ )

$$= \left[ \frac{BW_{feeder}}{BW_{sub-band}} \right] \times \left[ \frac{BW_{sub-band}}{BW_{ch}} \right] \quad (式 16)$$

ここで、

$BW_{feeder}$  : フィーダリンク周波数帯域幅

$BW_{sub-band}$  : サブバンド幅

$BW_{ch}$  : チャンネル幅

注 [ ]: ガウス記号

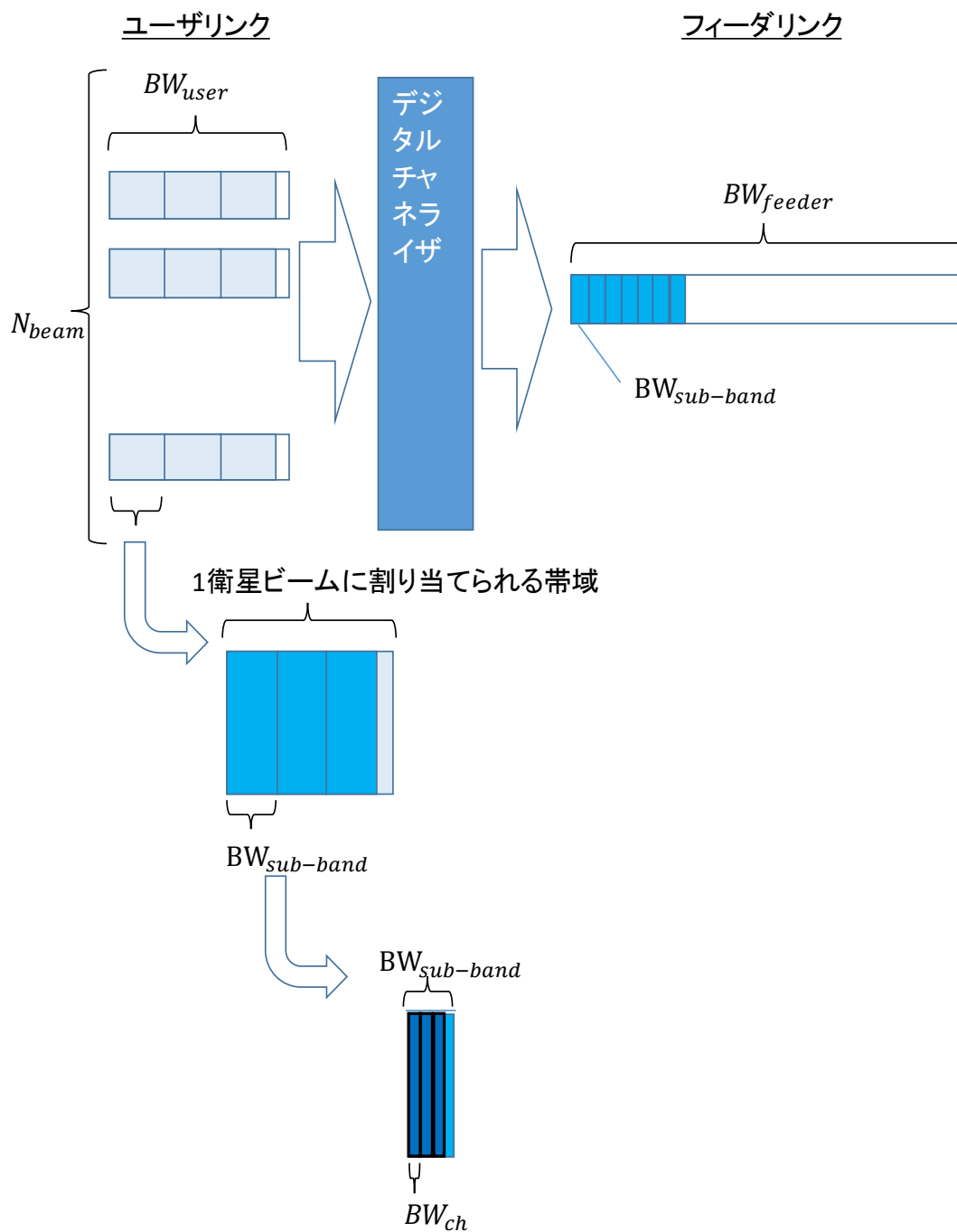


図 4.2-2 式中の記号の説明

システム全体での収容チャンネル数はフィーダリンク収容チャンネル数とユーザリンク収容チャンネル数のうち少ない方の値で決まることから、サブバンド幅を変化させたときのシステム全体の収容チャンネル数を求める。使用するパラメータとして、まず、ユーザリンク周波

数は移動衛星業務に割り当てられた 30MHz とした。次に、チャンネル幅は音声通信として 10kHz。衛星ビーム数は EEZ 内に 100 ビーム配置している。周波数繰り返し数は 7 ビームで一つのクラスタを構成する。フィーダリンク帯域はチャネライザによる周波数有効利用効果を目的として、ユーザリンク帯域の全ビーム合計 428MHz より少ない 400MHz とした。これらパラメータをまとめると表 4.2-1 の通りである。

表 4.2-1 収容チャンネル数計算パラメータ

BWuser	30MHz
BWch	10kHz
Nbeam	100
Ncolor	7
BWfeeder	400MHz

計算結果を横軸サブバンド幅にしてそれぞれの収容チャンネル数別に示すと図 4.2-3 の通りとなる。システム全体の収容チャンネル数はフィーダリンク収容チャンネル数とユーザリンク収容チャンネル数の少ない方の値として示される。

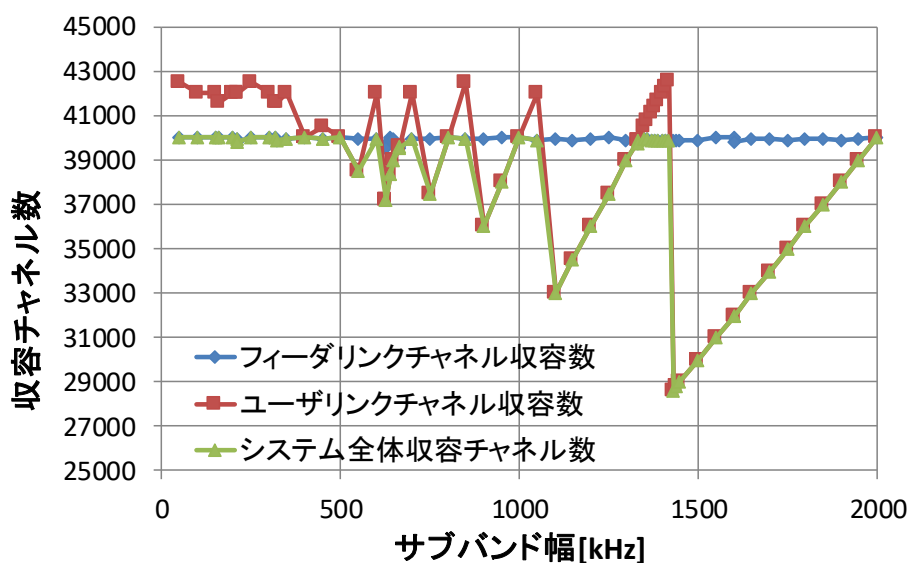


図 4.2-3 収容チャンネル数

図 4.2-3 のシステム全体の収容チャンネル数の結果から呼量均一条件では、チャネライザの効率の良いサブバンド幅は収容チャンネル数を計算することで求められることが示された。条件が変化した場合においても式 1 及び式 2 から収容チャンネル数を求めて、サブバンド幅が大きいほど回路規模を小さくできることから、極大値となるサブバンド幅のうち最も大きいものを選択すればよい。500kHz より大きい条件では、500～530、600～610、670～710、800～850、1000～1070、1350～1420kHz から選択すればよい。

式 1 や式 2 が示すのはユーザリンク（またはフィーダリンク）をサブバンドで埋めたときに出来る余りが少ないほど周波数利用率が良いことを示している。

#### 4.2.4 不均一呼量条件の検討

前節は、各ビームの呼量は均一である条件での検討であった。しかし、一般的に人の活動が船などに限られる海域のビームの呼量は、人が密集している都市などをエリアとする陸域のビームに比べると呼

量が少ないと考えられ、現実の運用を想定すると不均一呼量条件を検討する必要がある。特に、大規模災害時は、ビーム毎に呼量の差が大きく、不均一状態が激しい。しかも衛星のリソースを被災地ビームに集中する運用を行うため、被災地を含むクラスタのユーザリンク帯域幅の周波数利用率を検討する必要がある。本節では、陸域と海域の呼量差、呼量が多い被災地ビームを含むクラスタに注目した各ビームの呼量が不均一な場合の検討を行う。

#### 4.2.4.1 チャネライザ効果

本節ではまず、呼量の不均一による周波数利用率の違いについて比較した。対象とするクラスタは図 4.2-4 に示す通り、東日本に照射している7ビームとし、東日本クラスタと呼ぶ。東日本クラスタで陸域を照射しているのが1, 2, 4, 5の計4ビーム、海域を照射しているのが3, 6, 7の計3ビームある。

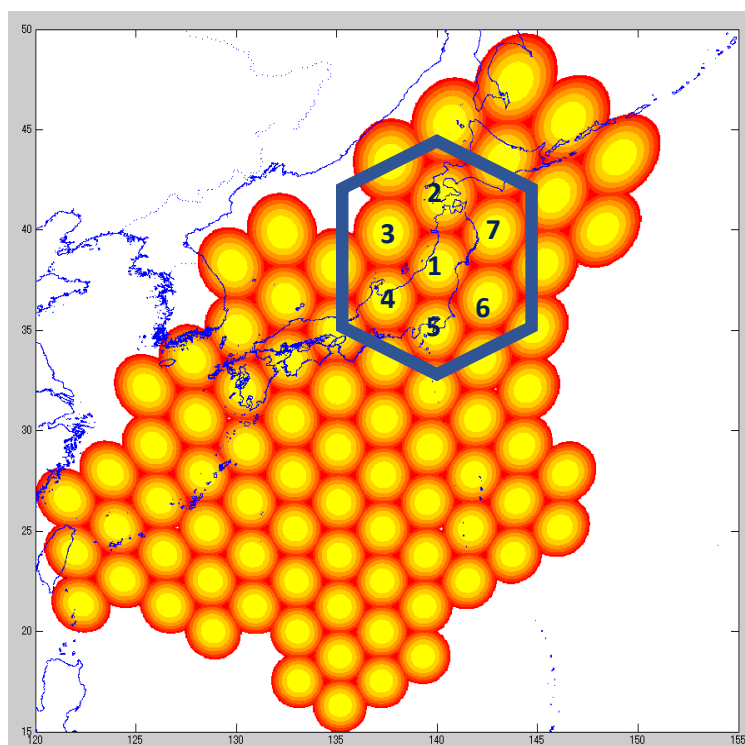


図 4.2-4 東日本クラスタ

海域では陸域より呼量が少なく、その差が大きいことが想定され

る。このため、陸域と同じ呼量であるとき、比海域呼量を1と定義し、この値を小さくすることによって呼量の不均一度合いを表した。そして、海域ビームの呼量が、陸域より少ない時の東日本クラスター7ビーム合計のユーザリンク帯域幅の使用チャンネル数を式1より求めた。この計算結果から、1クラスターが使用できるユーザリンク帯域幅30MHzの使用量を求め、周波数利用率として求めた。この計算結果を図4.2-5に示す。このとき、フィーダリンク帯域幅200MHz、300MHz、400MHzについて実施し、チャネライザありの条件でも計算した。サブバンド幅は、各条件で剰余の差が出ない1MHzとした。

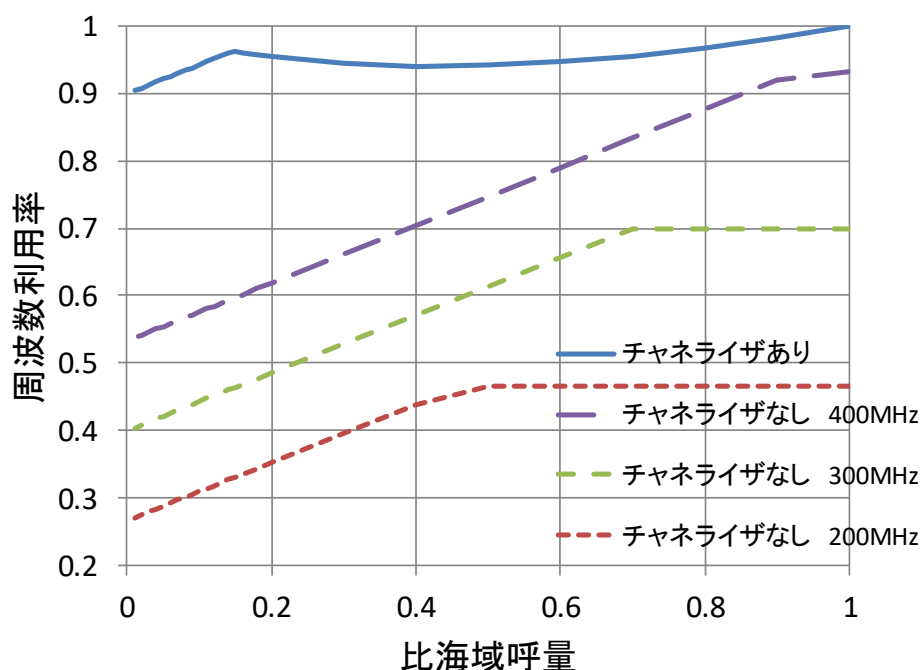


図 4.2-5 チャネライザ効果

図4.2-5に示す通り、チャネライザなしの条件では、フィーダリンク帯域幅を各ビームに均等に割り振ることになるので、ユーザリンク帯域幅を使い切れない条件となる。このため、フィーダリンク帯域幅が小さいほど周波数利用率は低くなる。これに対して、チャネライ

ザがある場合は、フィーダリンク帯域はチャネライジングすることにより効率的に使われるため、周波数利用率は高い値で保持される。海域に割り当てられる帯域が、1サブバンドより少ない条件でも海域での通信を確保するため、1サブバンドを割り当てるようにしているが、このため、割り当てられた帯域幅よりも呼量が少ない条件、すなわち、ここでは比海域呼量が0.15よりも小さい条件では、割り当てられた帯域を使い切れないため、単調減少となる。ゆえに、比海域呼量0.15で極大となっている。

#### 4.2.4.2 最適サブバンド検討

大規模災害時には被災地ビームへのリソース集中が必要となる。クラスタを構成する7ビームに、等分の帯域を割り当てたときの割合を1としたとき、被災地ビームに、3.7倍、5倍、6倍と割り振る量を変化させたときの条件で、周波数利用率の検討を行った。その他の衛星ビームの割合を含め、条件を表4.2-2に示す。

表 4.2-2 東日本クラスタにおける各ビームの呼量とリソース配分の条件

ビーム	条件1		条件2		条件3	
	呼量割合	帯域 [kHz]	呼量割合	帯域 [kHz]	呼量割合	帯域 [kHz]
1被災地	3.7	15857	5	21428	6	25714
2 陸	1	4285	0.6	2597	0.3	1298
3 海	0.1	428	0.06	259	0.03	129
4 陸	1	4285	0.6	2597	0.3	1298
5 陸	1	4285	0.6	2597	0.3	1298
6 海	0.1	428	0.06	259	0.03	129
7 海	0.1	428	0.06	259	0.03	129
計	7	30000	7	30000	7	30000

条件1では、海域での呼量を陸域の1/10と仮定してその割合に応

じた帯域を割り当て、これにより余った帯域を被災地ビームに割り当てた。条件 2 及び 3 では、被災地での発呼要求が更に多い条件として、5 倍、6 倍としている。発呼要求が多いため、被災地ビームの帯域を広げた。被災地ビーム以外のビームでは、被災地に割り振った分、帯域が狭まった条件となっている。大規模災害時において、被災地を含むクラスタの各衛星ビームに割り当てる帯域幅については、呼量割合から、あらかじめ決めた条件のうちどれかを選択することになると考えられる。東日本大震災の音声トラヒック状況[18]のように、大規模災害時には、急激に呼要求が発生する。被災地での呼要求は、緊急性が高いことから、できるだけ被災地ビームに多くの帯域を割り振る条件 2 あるいは 3 となる。この条件で式 1 から収容チャンネル数を求めた。この計算結果から、1 クラスタが使用できるユーザリンク帯域幅 30MHz の使用量を求め、周波数利用率とした。周波数利用率を計算した結果を図 4.2-6 に示す。

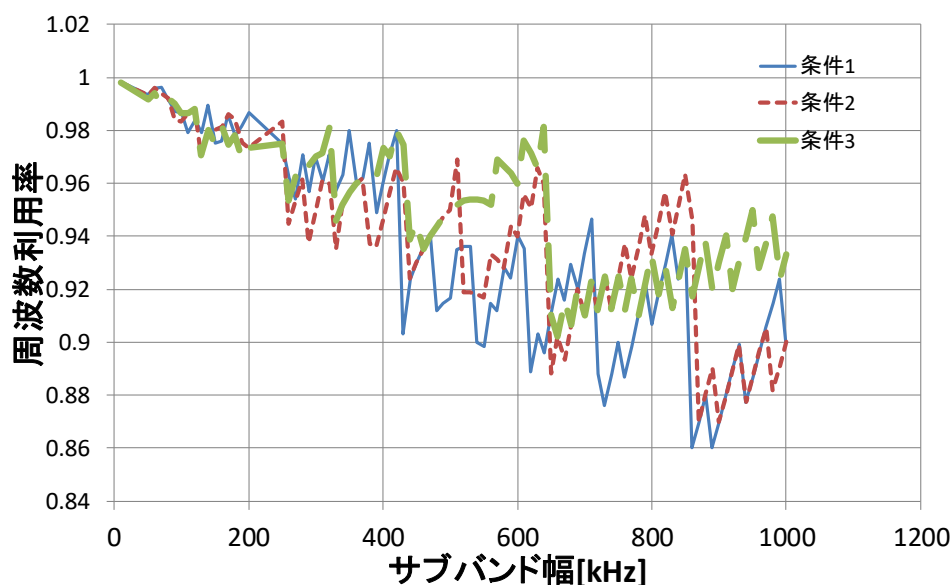


図 4.2-6 呼量不均一時におけるサブバンド幅の周波数利用率特性

図 4.2-6 の結果から、呼量不均一条件ごとに、周波数利用率が、サブバンド幅によって、細かい極大極小を持つことが分かった。この値



は、各 7 ビームに割り当てられた帯域幅に入るサブバンド収容数によって変化する。その際、被災地ビーム、陸域ビーム、海域ビームによって、与えられた帯域が異なるため、別々の特性となる。表 3 に示した各衛星ビームに割り当てられた帯域のうち、使用している帯域を周波数利用率として計算した。図 4.2-7 に条件 2 での衛星ビーム種別ごとの周波数利用率を示す。

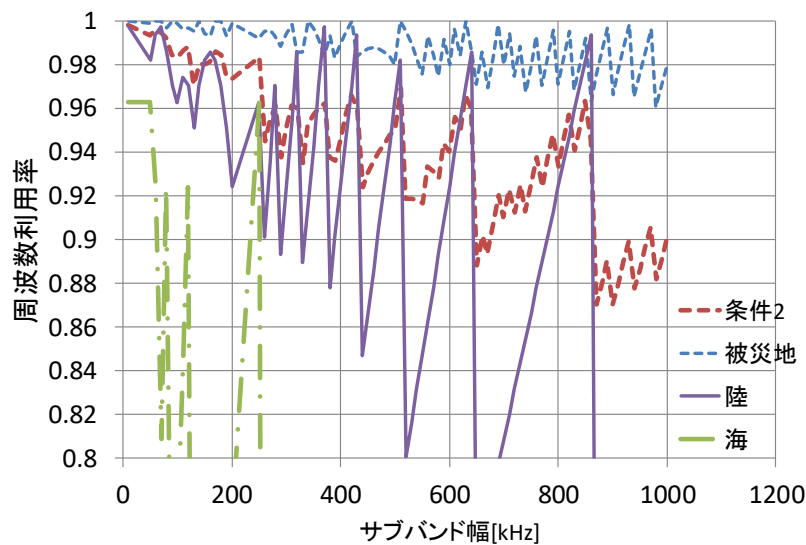


図 4.2-7 衛星ビーム種別の呼量不均一時におけるサブバンド幅の周波数利用率特性

図 4.2-7 は、条件 2 の特性を被災地ビーム、陸域ビーム、海域ビームの各条件に分解して示している。各特性は、被災地ビーム、陸域ビーム、海域ビームそれぞれ 1 ビーム当たりの周波数利用率特性を示している。陸域ビーム及び海域ビームはそれぞれ 3 ビームあるので、合成する際には 3 倍の寄与がある。

衛星ビーム種別の違いで、周波数利用率特性の極大極小となる条件について比較すると、特に寄与度が大きいのは陸域ビームである。これは同じ条件で 3 ビームあるためである。海域ビームについても 3 ビームあるが、サブバンド幅が大きくなると、割り当てられた帯域にサブバンドが一つも入らない条件となってしまうため、寄与度が

低い。例えば、条件 2 で割り当て帯域は 259kHz であるので、これ以上のサブバンド幅のときは、海域ビームにサブバンドは割り当てることができない。また、被災地ビームは、他のビームに比べて広い帯域を与えられているため、サブバンド幅の違いによる周波数利用率の変化は少ない。

この結果、大規模災害時条件で、周波数利用率を高い条件とするサブバンド幅は、寄与度が高い陸域ビームの周波数利用率が高い条件を選ぶのがよいことがわかる。サブバンド幅は大きくすれば、衛星搭載性が良くなるが周波数利用率が低下する。2.3 節で示した通り、衛星搭載性を考慮すると、サブバンド幅は、500kHz 以上で、周波数利用率が低下しない値を選ぶ必要がある。この条件 2 では 510kHz、630kHz、850kHz がよいと言える。

呼量不均一で、海域での呼量が少ない場合においても、海域での通信を確保することを考える。条件 2 でサブバンド幅 850kHz とした場合に、海域で 1 サブバンドを与えた場合、各ビームに割り当てる帯域は、表 4.2-3 のようになる。この帯域割り当てでは周波数利用率は 0.99 となるが、海域に与えた 850kHz は 259kHz しか使用しないので周波数利用率は 0.93 となる。

表 4.2-3 サブバンド幅 850kHz としたときの各ビームの帯域

	1 ビームあたり	クラスタ全体
被災地ビーム	19550kHz サブバンド数 23	19550kHz
陸域ビーム	2550kHz サブバンド数 3	7650kHz
海域ビーム	850kHz サブバンド数 1	2550kHz
合計	-	29750kHz

更にこの条件では、海域に割り当てられた帯域は、使用されていないので、この海域ビームのロス分を被災地と陸域の帯域に割り当てることで、周波数利用率を高める運用条件を考える。これは、東日本大震災の音声トラヒック状況[18]のように、被災地で絶対的に回線数が不足する事態が発生した際に、海域ビームの帯域を被災地に割り当てることを想定した。表 4.2-2 の条件 2 において、図 4.2-7 で示したように、極大点となる 510kHz、630kHz、850kHz について考える。このサブバンド幅条件のときに、被災地ビームと陸ビームに海域ビームの帯域を割り振ると表 4.2-4 のとおりになる。

表 4.2-4 周波数利用率が極大となる条件

	サブバンド幅 510kHz	サブバンド幅 630kHz	サブバンド幅 850kHz
被災地ビーム	21930kHz サブバンド数 43	22050kHz サブバンド数 35	22100kHz サブバンド数 26
陸域ビーム	2550kHz サブバンド数 5	2520kHz サブバンド数 4	2550kHz サブバンド数 3

表 4.2-4 の条件で周波数利用率を計算した結果を図 4.2-8 に示す。

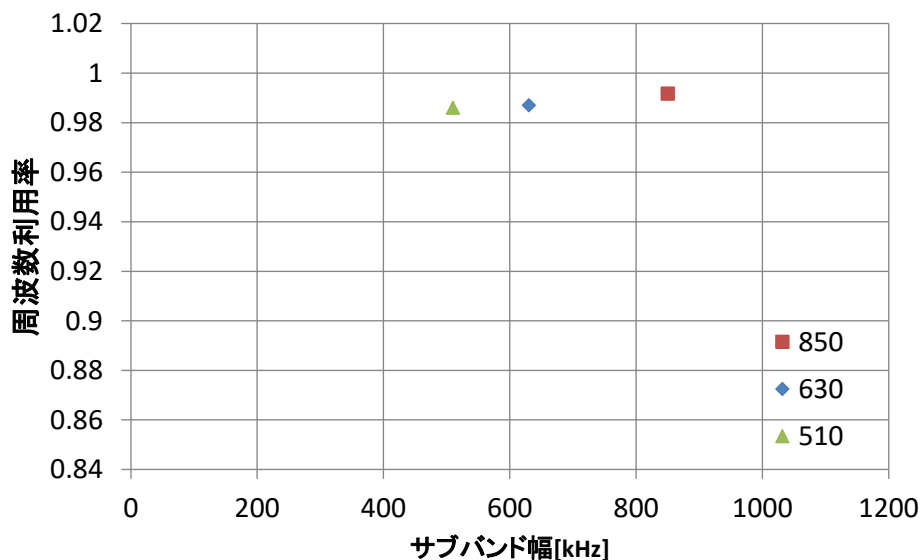


図 4.2-8 収容チャネル数を考慮した周波数利用率

最適条件とするサブバンド幅 850kHz を含め各 3 サブバンドいずれの条件でも、周波数利用率 0.98 以上の結果となる。

本検討結果は、表 4.2-2 の条件 2 の帯域割り当てを行った上、海域ビームへ割り振った帯域幅を被災地ビームと陸域ビームで使用する場合であった。利用率が極大となるのは、陸域ビームに割り当てられた帯域幅をサブバンド幅で割った際の剰余が極小となる場合である。このため利用率が極大となるサブバンドの導出は、帯域割り当てが違ってもこの方法で可能である。

帯域割り当ては、被災地ビームを優先して、帯域を割り振ったのち、ユーザリンク帯域幅の制限の範囲で、陸域ビーム帯域幅が変わるだけなので、極大となるサブバンド幅が大きく変化することはない。

海域ビームに割り振られた帯域を被災地ビーム及び陸域ビームで使用してもよい場合であれば、陸域ビームは極大点を選択しているので、被災地ビームの帯域をサブバンド幅で除した剰余によるロスにより、周波数利用率低下となり、周波数利用率は図 4.2-80 とほぼ同様の値をとることになる。

## 4.2.5 均一呼量、不均一呼量条件での最適サブバンド幅

デジタルチャネライザは、ビームごとの呼量の違いを吸収して、フィーダリンク帯域幅の周波数利用率を高くすることができる。呼量が少ない海域をもつ条件ではデジタルチャネライザがない条件と比較して2倍以上の周波数利用率となる。

クラスタ構成による周波数再利用をするシステムでは、同じ周波数を使用しているビームの空間距離を確保する必要があることから、ビームに与える帯域幅は、別のクラスタでも同じ位置にあるビームは同じ帯域幅にする必要がある。このため必然的に全クラスタを使用する平時では、クラスタ構成数で等分した帯域幅を衛星ビームに割り当てることになる。これは、4.2.3 節で実施した呼量均一条件となる。呼量均一条件ではフィーダリンク帯域幅、ユーザリンク帯域幅をサブバンド幅で割った剰余がともに少ない条件が周波数利用率が高い。

大規模災害時に衛星リソースを集中するので呼量不均一条件である。このとき被災地ビームを含むクラスタにリソースを集中させることから、ユーザリンク帯域幅のうち陸域に割り当てられた帯域幅をサブバンド幅で割った剰余が少ない条件は周波数利用率が高い。

呼量均一条件を平時条件、呼量不均一条件を大規模災害条件とみなして両条件において周波数利用率が高いサブバンド幅を算出した結果、最適サブバンドは主としてユーザリンク帯域幅が関与し、両条件を満足するサブバンド幅は 850kHz となった。

## 4.3 本章のまとめ

デジタルチャネライザは、ユーザリンクのチャンネルとフィーダ

リンクのチャネルを交換する機能を持つ。デジタルチャネライザの効率的な運用は周波数の有効利用となると同時にトラフィックフローの極大化につながる。チャネライザ運用制御による高効率トラフィック制御を検討した。

衛星搭載用装置は、衛星リソース配分の枠組みに収まるよう装置規模を抑えることが必要になる。デジタルチャネライザは、変換を1チャネル単位ではなく、チャネルを数個まとめたサブバンド単位で行うことで規模を搭載可能レベルにする。このサブバンド幅が周波数利用率に影響を与えることを示し、周波数利用率向上のためのサブバンド幅の条件について検討した。

まず、各ビームの呼量が均一の条件では、フィーダリンク帯域幅、ユーザリンク帯域幅をそれぞれサブバンド幅で割った時の剰余が小さい時に効率が良く、最適値を求められることを示した。

次に、呼量が少ない海域ビームや呼量が特に多い大規模災害時の被災地ビームを考慮した各ビームの呼量が不均一の条件では、呼量が多い被災地ビームを含むクラスタにはリソースを集中させる必要性から、このクラスタが使用するユーザリンク帯域幅の周波数利用率を高めるため、利用率への寄与度の大きい陸域ビームに割り当てた帯域を無駄なく使い切るサブバンド幅を選択するのがよいこと、さらに、海域ビームは割り当て帯域がサブバンド幅より少ない場合は周波数利用率を下げるので、その帯域を被災地ビームや陸域ビームに割り振ることにより、最終的に周波数利用率を0.98以上にすることができることを示した。

呼量均一条件は平時の条件、呼量不均一条件は大規模災害時に被災地ビームに衛星リソースを集中した条件である。この2条件がSTICS運用での代表的な運用条件である。よってこの2条件に共通した最適サブバンド幅を選択するのが良い。計算の結果、両条件において共通の周波数利用率が高いサブバンド幅は850kHzである。

# 第5章 公平性を考慮した呼受入 制御による高効率トラヒック制御

地震などによる大規模災害時のトラヒックの急増に対して、輻輳によるシステムダウンを回避し、通信環境を確保する必要がある。このためには、トラヒックのシステムへの受け入れを制御する呼受入制御（CAC: Call Admission Control）が必要である。本章では、STICSのCACとして、災害時に特化した通信の在り方を示し、通信機会の公平性を重視した制御をすることで、輻輳の一因となっている再呼の発生を防ぎ、輻輳の解消にも役立つ高効率なCACを提案する。

## 5.1 概要

STICSはマルチビーム衛星通信システムである。STICSで使用するMSSバンドは、ITU-Rにて地上と衛星の移動体通信向け周波数として規定されている。地上システムとの接続がないマルチビーム衛星通信システムでは、衛星の容量を考慮した上で輻輳が生じないサービス端末数を決定できる。しかし、STICSでは一般に普及している地上携帯電話の端末が地上と衛星の両方を使えるのが前提で、衛星の容量をはるかに超える端末数が存在している。

STICSは大規模災害時などで地上の携帯電話システムが使えない時の通信インフラとして期待されているが、大規模災害時には通信需要が膨大になるため、収容数を超えてあふれてしまう。対策としてトラヒックフローに順序を与えて輻輳を避ける制御を導入する。大

規模災害時の通信需要を考慮した CAC を提案する。本章では通信機会の公平性について説明し、提案する 3 つの CAC の詳細について述べ、提案法を評価するのに用いた、東日本大震災時の仙台市の携帯電話のトラヒックや基地局の停波状況を模擬したシミュレーションモデルと及び考察について示す。

## 5.2 大規模災害時の呼受け入れ制御

東日本大震災では、NTT 東日本において固定系通信設備被害によって約 150 万ユーザがサービスを利用できない状況になった [29]。これらの被害を受けず通信ができる環境であっても、被災直後の爆発的な通信需要のため、通信事業各社は 70~95%の呼受入制御（発信規制）を実施した。これらのため、携帯電話の音声サービスが、発災後しばらくの間、ほとんど利用できない状況となった [29]。さらに、地上携帯電話システムにおいては、端末がアクセスする基地局の倒壊、長期間の停電による基地局停波により、多くのユーザが通信できない状況となった。震災時に、通話できなくなった地域を示す資料 [30]から著者らが解析した結果、東日本大震災では仙台市付近の 79.6%の地域（元々の電波不感地域は母数から除いた）が通話不可となっていたことがわかった。また、家族や知人の安否確認等を、一般に普及し、普段携帯していることが多い地上システムの携帯電話端末で行おうとするため、発災直後から通信需要が急増し、輻輳状態になる。実際に、NTT ドコモの東日本大震災時の被災地の通信要求は平時の約 60 倍になったと報告されている [18]

STICS は、このような地震など大規模災害時に、地上基地局が利用できないエリアの通信インフラとして安心・安全な社会システムの一助としても活躍が期待されている。しかし、一般に衛星システムは、衛星に持たせられるリソースに限界があること、衛星ビームのエリアが大きく、同一周波数の繰り返し利用が少ないなどのため、システム容量が少ない特徴を有する。



STICSでは、携帯端末から衛星へ直接アクセスし通信を行うため、安否確認等により大量の通信要求がある時に、地上基地局の多くが停波することになれば、大量の通信要求が衛星システムへ向かうことになる。衛星へのアクセスが非常に多くなると、衛星のLNA (Low Noise Amplifier) への入力レベルが飽和電力を超え、機能劣化が発生してしまう。さらには、輻輳により衛星システム全体がシステムダウンしてしまうことになる。

固定系通信設備被害によって通信できなかった150万ユーザ [29] がSTICSを利用した場合、STICS衛星の収容チャンネル数は1万程度あるから150倍の発呼要求となる。STICSでは既存の地上通信システムとは桁違いの通信要求に耐えられかつ運用できるシステムを構築する必要がある。このため、これまでにない強力な呼受入制御 (Call Admission Control, CAC) が必要になる。しかし、単に、受入制御を行うと、受け付けられなかった通信要求が多くなってしまう。そして、通信要求の強いユーザは、何度も再呼を繰り返すため、さらに輻輳が激しくなってしまう。

大規模災害時には、安否確認のために短時間の肉声による通話が求められる[35]のでこの要求に応えることに焦点を当てた制御をすることで再呼を抑え、早期にトラヒックの正常化すること目的とする。CACはユーザに受け入れやすいように、通信機会の公平性を重視する受入制御を導入する。

システムダウンを回避し、公平性を重視した呼受入制御 (CAC with user satisfaction in fair communication chance, CACFC) を提案する。具体的には、次の3種の呼受入制御法を提案する。

**再通信要求不可時間制御 (Re-call call access suppress time control, RSTC)** : 通話成功した端末が、直ぐに、別の通話ができるのは、1回も通話が出来ずにいる端末を考えると、公平とは言えない。そこで、通信成功した端末に一定時間通信要求を発しないように制御する。

**接続長時間待ち優先制御 (Priority control for long waiting call, PCLWC)** : 長い間接続が出来ていない端末も、優先して接続するこ

とが必要である。そこで、過去の通信要求が数回あっても通信許可されていない場合は、いわば長い待ち状態にあるユーザであると考え、最初に通話要求(発呼)してからの経過時間が長いほど優先度が高くなるように優先度を上げるバイアス値を用いて、待ち時間が長いほど優先度合いを上げるように制御する。

**上限付き再呼回数優先制御 (Priority control by retry call number with upper limit, PCRCN with UL) :** 再呼を何度も繰り返している端末は、システムに負荷を与え、輻輳を増長させるが、逆に、緊急度が高く、接続を優先すべき端末でもあると言える。しかし、単に、再呼回数が多い端末を優先して接続するということになると、再呼が何度も繰り返えされることになってしまう。そこで、端末が行える再呼回数に上限を設け、それ以上は再呼が出来なくなるようにする。

通信が成功したユーザが、他のユーザに通信の機会(通信リソースの使用)を譲ろうという時に、今まで何回も通信しているユーザがその通信リソースを使用することになれば、不公平感が起こり、通信の機会を譲ることに不満感を抱くことになる。逆に、長い間通信できなかったユーザに通信の機会を譲る、また、どうしても通信したくて何回も再呼しているユーザに譲るということならば、譲るユーザにも納得出来ると考えられる。

そして、これらの制御では、再通信要求不可時間、再呼の受入上限回数を、衛星から報知チャネルを使い報知する。そして、端末は受信した報知チャネルの情報と自端末の状況により、自端末が再通信要求不可時間の間である端末であることや、再呼回数が再呼の受入上限回数を超えた端末であるか判断し、再呼が出来ない状態である時は自己制御により、ユーザが再呼しようとしても端末が受け付けられないようにする。これらは、いわば、ネットワークと端末の協調制御となっている。さらに、端末が受信した報知チャネルの情報を、ディスプレイ表示などにより、ユーザに知らせることで、今のネットワークの状況では接続要求しても受け付けられないことを、ユーザに自覚

させ、ユーザが再呼しないように誘導するユーザ誘導型の制御もユーザが無駄な行為をしないことになり、ユーザの公平感は増加すると考えられる。

大規模災害時における CAC に関する研究は、文献[31][32][33][34]ですで行われている。しかし、半径数 km のセルを用いて同一チャネルをサービスエリア全体では何回も繰り返し利用し、通信容量が大きい地上の携帯電話システムと、半径数百 km のビームを用いて同一チャネルの繰り返しが少なく、限られた容量の衛星通信システムの統合システムにおいて、災害時に誰もが安否確認などを行うという非常に通信需要が多い状態で、通信機会の公平性を重視する制御を行うことで、ユーザが制御を納得し、再呼の発生を抑えることを目的とした呼受入制御の研究は見当たらない。

災害時の通信手段としては、電子メールや SNS あるいは災害用のサービスとして伝言ダイヤルや伝言掲示板などがあるが、東日本大震災での調査 [35]では肉声での安否確認を希望する人が全体の 84% となっている調査結果から、本論文では、音声通話サービスを対象とする。

### 5.3 通信機会の公平性を重視した呼受入制御

#### (CACFC)

地上携帯電話システムである LTE では、呼受入制御として、アクセスクラス制御を行っている。アクセスクラス制御とは端末ごとに割り振られたアクセスクラスとしての番号により、接続要求信号の送信（アテンプト）を許可するか否かを制御する方法である。受け入れを規制する場合はネットワークから端末への報知情報に規制情報が入れられ、その内容と端末の持つアクセスクラスとを比較することにより、端末自身がアテンプトを許可するか否かを判定する。アクセスクラスは通常 0~9 の番号が割り振られているが、10 よりも大き

いアクセスクラスも存在し、それは公共安全（警察、消防、政府など）等の特別なユーザに割り当てられた端末としている [22]。

これら呼受入制御は、通信サービス用の周波数帯域とは別に、NOCからの制御用回線を独立して確保することとする。

災害が発生すると多くの端末から通信要求が出されるが、通信要求が受け入れられない場合にアクセスクラス制御では一度通信成功した端末であっても、次の通信要求の成功確率は同じであるので、再度通信要求をして成功することもある。ユーザ心理を考えると、通信したい要求が強い安否確認のための呼が受け入れられないと、再呼を何回も繰り返すことになり、輻輳に拍車がかかっていく。そして、一度も通話成功しない端末と複数回成功する端末が出現することも起こり得ることになる。

移動体衛星通信に期待する機能として、災害時の通信インフラのバックホールがある。しかし人口が多い地域での大規模災害では、爆発的な通信要求に対応できず輻輳状態に陥ることが予想される。また、輻輳を避けるために一般ユーザに単に厳しい発信規制をかけては、通信インフラとして、ユーザの期待する役割が担えないことになる。

そこで、本論文では、大規模災害発生時に通信機会の公平性を重視した CACFC として 3 つの制御法を提案している。以下順に詳細を述べるが、この提案法の具体的な制御方法は、LTE のアクセスクラス制御を拡張し、端末を通信が成功した端末、長時間接続待ち状態の端末、再呼回数が多い端末などで分類しクラス分けして制御するものである。

本論文では、大規模災害時に 120 秒程度の安否確認の通話を 1 回以上出来ることを目的として呼受入制御法を検討する。また、本論文での通信機会の公平性とは、上記通話の成功回数が特定の端末に偏らずに配分されていること（通信機会の均等）。通信要求のタイミングと接続成功までの時間差が少ない（待ち時間の均等）。緊急性を考慮した接続（通信要求代償の均等）であることとする。

(1) 再通信要求不可時間制御 (Re-call call access suppress time control, RSTC)

通話成功した端末は、所定時間内は再呼を禁止する制御である。多くのユーザが通話要求をする環境下であれば、通話機会の公平という観点で一度通話成功した端末は通話機会を他端末に譲るという意義がある。また、発呼禁止機能を端末側に持たせれば、回線の輻輳を軽減する効果もある。

再呼を規制する方法として、端末の電話番号の末尾のディジットで発呼を許可する時間帯かどうかの判定をして、再呼による基地局処理量の削減を行う研究[36]がある。これはいわばユーザを 10 カテゴリに識別したのち、時分割接続をしていることになる。1/10 に削減された端末数のうち発呼する数が、トラヒック容量に収容できれば効果があるが、この与えられた時刻に発呼しても接続しにくい場合は、再呼が繰り返されることに変わりない。

RSTC では、端末数によらず実施可能である。またユーザが発信可能な時間を判断して発呼する煩わしさはない。そして通話成功端末は所定時間規制されることで公平性が高くなる。

制御の方法としては、トラヒック状態から NOC にて再通信要求不可時間を決定し、GW 局で報知情報内に再通信要求不可時間情報を含ませておき、端末側で直近の通話記録と比較したうえで可／不可を判定する。

(2) 接続長待ち時間優先制御 (Priority control for long waiting call, PCLWC),

通話要求したユーザが制御により通話できなかつた時、厳しく制御されている状況がディスプレイ表示されていれば、通常は、しばらく時間を置いてから再呼しようとするかと推定できる。このように過去に通話要求が許可されていない再呼は前から、いわば待ち状態にあるユーザであると考えられ、待ち時間が長いほど優先度合いを増

加させるようにする。

図 5.3-1 に接続長待ち時間優先制御をしたとき優先度合いが上がるイメージを示す。最初に発呼して通話不可であったとき、それからの経過時間が長いほど優先度が上がる制御を行う。通信要求が強いユーザは繰り返し通信要求をされると考えられるが、繰り返し回数のみを優先度を上げる指標にすると、しばらく時間をおいてから通話を試みようとするユーザを排除してしまう結果となる。これを救済し、より通話の公平性を高める意味がある。

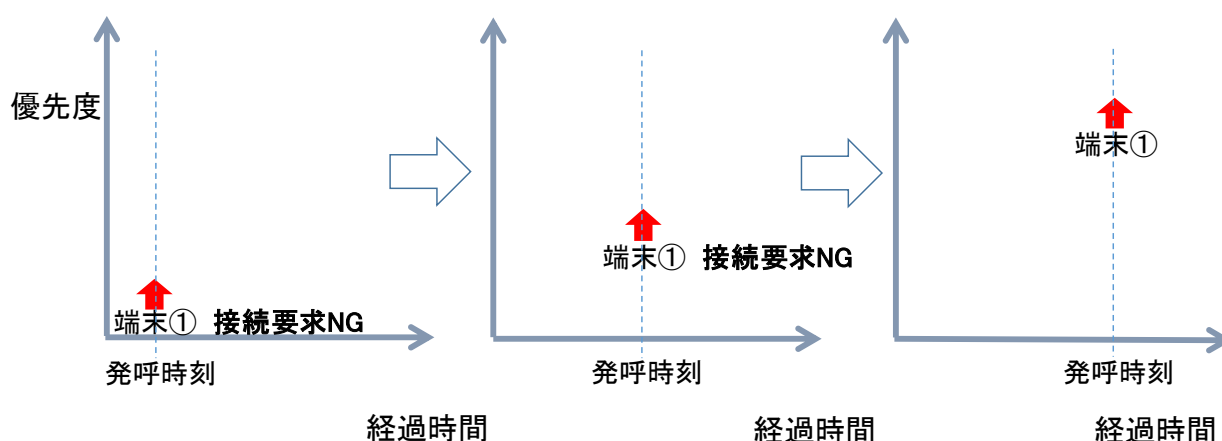


図 5.3-1 接続長待ち時間優先制御のイメージ図

制御の方法としては、最初に発呼した時刻からの経過時間をパラメータとした優先バイアス値を算出し、アクセスクラス制御の端末値に加算をして優先度を高める。優先バイアス値は以下の式から算出する

$$\text{優先バイアス値} = \text{待ち時間[s]} \times \text{制御パラメータ} \dots \text{(式 17)}$$

制御パラメータはトラヒック状態から PCLWC 強度を決定する任意の値である。

優先バイアス値はトラヒック状態から NOC にて決定し、報知情報内に含ませる。GW 局は発呼された端末のうち、優先バイアス値が高

いものを選択して接続を行う。

(3) 上限付き再呼受入回数優先制御 (Priority control by retry call number with upper limit, PCRCN with UL)

再呼回数が多い端末ほど優先度が上がる制御である。繰り返し再呼するユーザは、どうしても通信したいという状況であることが想定され、緊急度合いが高い通信要求であると考えられる。そこで、再呼回数に応じて高い優先バイアス値を与える。図 5.3-2 に本制御のイメージ図を示す。

しかし、再呼回数が多いほど優先度が上がる条件にすると、再呼を何回も繰り返すことで通話の機会を得ようとするユーザが現れ、再呼が頻繁に起こり、輻輳が増すことが考えられる。そこで、再呼回数に応じた優先バイアス値は上限値を設け、それを超えると、再呼しても優先度は上がらないようにする。再呼回数の上限値をディスプレイ表示するなどユーザに周知しておきユーザが無駄な再呼しないように誘導するか、再呼回数の上限值まで行くと端末が強制的に再呼出来ないように制御する。

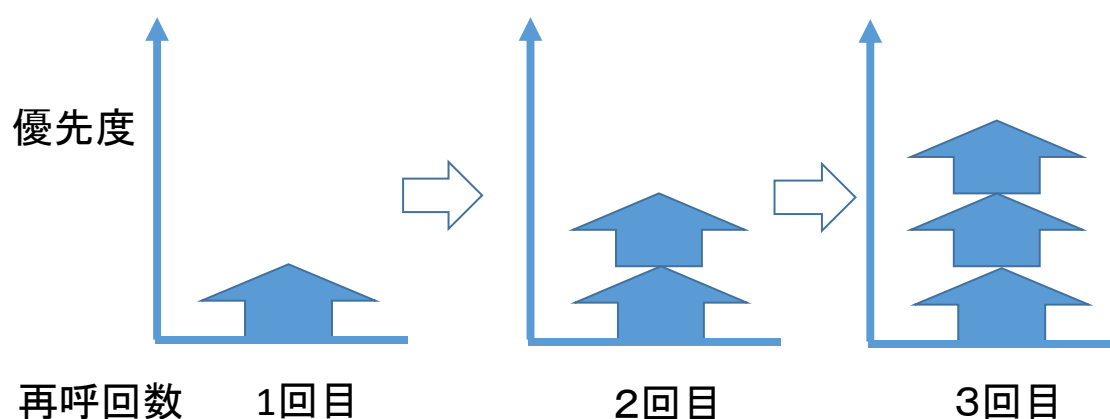


図 5.3-2 再呼回数による優先制御イメージ

制御方法としては、再呼回数をパラメータとした優先バイアス値

を算出し、アクセスクラス制御の端末値に加算をして優先度を高める。この場合、再呼する通信相手の違いは考慮しない。優先バイアス値は以下の式から算出する。

$$\text{優先バイアス値} = \text{再呼回数} \times \text{制御パラメータ} \dots (\text{式 18})$$

制御パラメータはトラヒック状態から PCRCN 強度を決定する任意の値である。

優先バイアス値はトラヒック状態から NOC にて決定し、報知情報内に含ませる。GW 局は発呼された端末のうち、優先バイアス値が高いものを選択して接続を行う。

## 5.4 シミュレーションモデル及び条件

提案する3種のCACに想定される課題と効果について評価するため、計算機シミュレーション環境を構築し、災害時を想定した条件でのシミュレーションを行った。提案するCACでは、パラメータを変化させることで、CAC効果の強度を変化させるため、パラメータ値の取り得る値を求める。

シミュレータでは地上システムに比較して非常に少ない通信容量となる STICS 衛星と、大規模災害時に多くの発呼要求が発生する条件として、東日本大震災を選択した。東日本大震災ではトラヒック変動の具体的な数値が公開された[37]。シミュレーションではこれらのデータを使用することとした。

仙台市は東日本大震災の震源地に最も近い政令指定都市で東北最大都市である。東日本大震災で基地局倒壊などにより通信できなくなった地域を示す資料 [30]から不通となった面積を求め、カバーエリアとなっている面積の割合で計算したところサービスが提供されていない割合は 79.6%であった。2013 年の仙台市の人口が 104 万人であった。そこで、東日本大震災では仙台市の全体の 79.6%の地域が基地局の倒壊などにより不通となったことから



仙台市 104 万人  $\times 0.796 \div 80$  万人  
をシミュレーション条件での端末数の母数とした。

東日本大震災時のトラヒックは平時の 60 倍発生したと述べている [18]。平時の陸上移動端末の一端あたりでの最繁忙時呼量が 0.015erl と電波法関係審査基準 [38] で推定されていることから、

$$0.015\text{erl} \times 60 \text{ 倍} = 0.9\text{erl} \cdots \text{(式 19)}$$

1 端末 0.9erl ということはほぼすべての端末が通信要求をしていたことになる。これに先ほど地上システムのサービスが提供されていない端末数が 80 万端末あることから、衛星へ向かう全体の呼量は

$$80 \text{ 万端末} \times 0.9\text{erl} = 72 \text{ 万 erl} \cdots \text{(式 20)}$$

保留時間を 120 秒とすると 1 秒間に発呼する呼数は

$$72 \text{ 万 erl} \div 120 \text{ 秒} = 0.6 \text{ 万} \cdots \text{(式 21)}$$

すなわち本条件では毎秒 6000 端末が発呼した状態となる。

次に衛星通信の回線容量であるが、これは本サービス用として許可される周波数帯域の広さによって決まる。STICS では移動体通信用に確保されている IMT-2000 バンドの衛星通信用バンド MSS の上り、下り各 30MHz をユーザリンクとして使用することを想定している。STICS 衛星ではデジタルビームフォーマを搭載し、衛星ビームを任意に設定することができ、被災地ビームにリソースを集中した場合、デジタルチャネライザによりユーザリンク帯域幅の通信をフィーダリンクに変換することができる。これらのことから、30MHz をすべて使用できることとする。通信方式は衛星通信と親和性が高い FDMA とし、1 チャンネル 9.6kHz を使用することとする。この条件

で最大 1 万チャネルの通信容量となる [10]。

すなわちユーザリンク帯域に収容できる 1 万チャネルが上限となる通信容量で每秒 6000 呼の要求があるモデルを模擬する。

呼受入制御は、通信サービス用の周波数帯域とは別に、NOC からの制御用回線を独立して確保することとする。報知情報は TDMA で送信できるので、通信サービスほど帯域は必要としない。シミュレーションでは 80 万端末としており、これらの制御回線は災害時も確保できていることとする。

シミュレーション条件をまとめると以下の通りとなる。また、シミュレーションする時間については東日本大震災でのトラヒック状況 [18]で、発災後 1 時間程度でトラヒックのピークが減少に転じていることから、CAC による制御は発災後 1 ～ 2 時間後程度まで実施することとしている。

#### (1) 被災地モデル条件

- 1) 総端末数：80 万端末
- 2) 呼量：0.9erl/端末
- 3) 保留時間：120 秒の指数乱数
- 4) シミュレーション時間：発災後 1000 秒～4000 秒

#### (2) STICS 衛星条件

- 1) STICS 衛星通信チャネル容量：1 万チャネル
- 2) ユーザリンク帯域幅：30MHz
- 3) チャネル帯域幅：9.6kHz
- 4) 通信方式：FDMA

#### (3) シミュレーション条件

- 1) RSTC：再通信要求不可時間；0[s]から 6000[s]
- 2) PCLWC：優先バイアス値＝待ち時間[s]×制御パラメータ  
制御パラメータを  $1 \times 10^{-4}$  から  $2 \times 10^{-3}$  まで変化

3) PCRCN : 優先バイアス値 = 再呼回数 × 制御パラメータ  
再呼回数にバイアス値を乗じた制御パラメータを 0.005 から 0.5 ま  
で変化。

PCRCN の効果を確認するため上限値は設定しない。

## 5.5 シミュレーション結果

これまで示した提案する 3 種の CAC について個々の特性を評価し、制御パラメータの感度を調査するシミュレーションを行った。

### (1) 再通信要求不可時間特性; RSTC

再通信要求不可時間制御では通話成功端末は設定時間内では再呼を禁止される。一度通話成功した端末は、通話成功できていない端末よりも通話機会の優先度を下げることにより通話機会の公平性を高める。

大規模災害時は、平時に地上システムで通信している端末が基地局倒壊などの理由から衛星システムを使うことにより急激に通信要求が増えることが STICS 特有である。

STICS で想定する大規模災害時の呼量である 1 端末当たりの呼量が 0.9erl 条件のとき、再通信要求不可時間を変化させて全端末のうち 50%が通話成功するまでの時間を計算した。図 5.51 の実線でシミュレーション結果を示す。

図 5.5-1 の縦軸は発災後からの経過時間を示している。これは、東日本大震災のトラヒック状況から、発災直後から通信要求が急増することがわかっている。ユーザが発災直後から通話要求し、通話成功まで再呼を繰り返す条件では、発災直後から通話成功までの経過時間によって評価できるためである。

再通信要求不可時間が 0 秒であることは RSTC による制御を実施していないことを意味している。再通信要求不可時間が 0 秒の時、全端末の 50%が通話成功するのに 6483 秒かかった。RSTC の制御を

すると全端末の 50%が通話成功するまでの時間は短くなり、再通信要求不可時間を 6000 秒にしたときは 4693 秒であった。これにより RSTC 制御をしない場合に比べて 27%速く通話が出来たことになる。

比較対象として、1 端末当たりの呼量を最繁時呼量と同じ 0.015erl の条件で、同様に全端末の 50%が通話成功するまでの時間を計算した。計算結果を図 5.5-1 の点線で示す。RSTC 制御をしない場合に比べて制御をしたほうが通話成功するまでの時間は短くなるが再通信要求不可時間による違いは少ない。これは、0.015erl の場合は、発呼数が少ないので経過時間とともに回線利用率が下がり、再通信要求不可時間を長くしても制御の効果が薄れてしまうためである。

再通信要求不可時間 1000 秒以降では、一端末当たり 0.9erl 条件の結果よりも一端末当たり 0.015erl 条件の結果の方が全端末の 50%が通話成功するまでの発災後からの経過時間が長い理由は、一端末当たり 0.9erl 条件では毎秒の発呼数が 6000 呼であるのに対して、一端末当たり 0.015erl 条件では 100 呼であるため、毎秒あたりの通信要求する呼が少なく、全端末の 50%が通話成功するまでの発災後からの経過時間が長くなるためである。

本制御はトラヒック量が多い条件の時に効果があるが、トラヒック量が少ないと効果は限定的である。このため本制御により、トラヒック量が下がってきたときは、再通信要求不可時間を短くして再呼を受け入れるアダプティブな制御を行えばより回線利用率が高い運用が見込める。

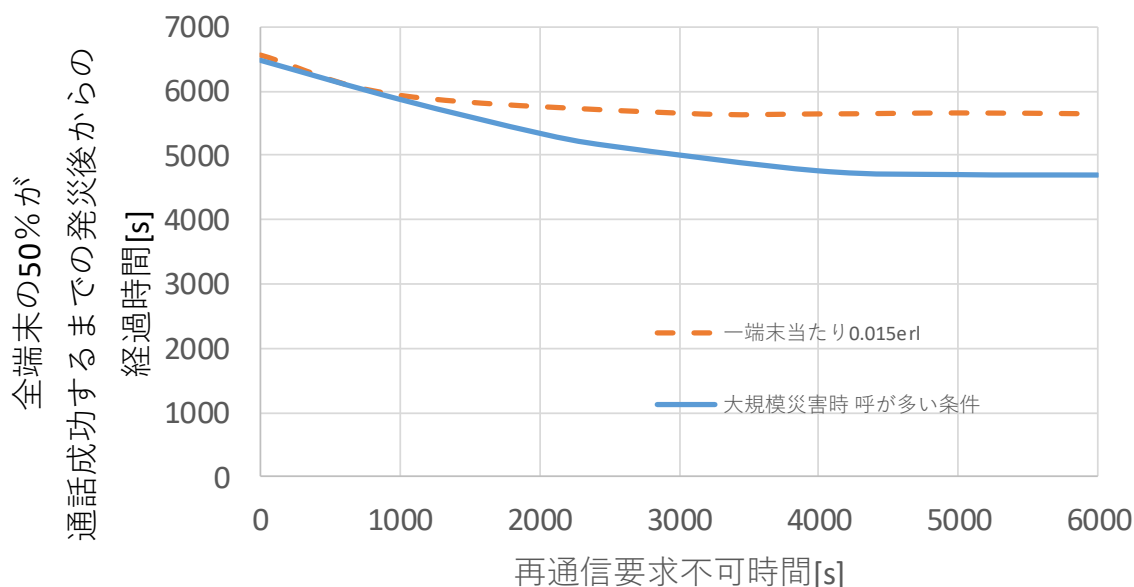


図 5.5-1 再通信要求不可時間特性(RSTC)のシミュレーション結果

シミュレーション時の回線状況を表 5.5 1 に示す。0.9erl 条件での回線利用率は 94~100%であった。再通信要求不可時間が長くなると回線使用率が落ちている。これは RSTC 制御により通信要求できない端末が増えて、シミュレーション時間の終了に近い時刻では回線に空きができたためである。保留時間が 120 秒固定で簡易計算をすると、毎 120 秒ごとに 1 万端末が RSTC 制御により再通信要求不可となるので、5000 秒経過の時点で  $5000/120 \times 10000 = 416,666$  端末すなわち全 80 万端末のうち半数あまりが再通信要求不可となる。

トラフィック量の違う 2 条件で提案する呼制御を使用したシミュレーションを行い、よりトラフィック量が多い時に効果が高くなる結果を示した。

表 5.5-1 シミュレーション時の回線状況 (0.9erl 条件)

	再通信要求不可時間 0秒	再通信要求不可時間 2500秒	再通信要求不可時間 5000秒
生起呼数	38,885,057	24,821,033	21,315,824
通信成功呼数	548,214	436,674	400,001
通話成功端末数	400,001	400,001	400,001
呼損数	38,336,843	24,384,359	20,915,823
呼損率	0.99	0.98	0.98
回線利用率	1.00	0.97	0.94

衛星通信の回線容量は、今後も大きく増えることはない。これに対して地上通信の端末数は常に増大している。特別な制御を行わない限り、衛星は地上システムからの急増する通信要求をすべて処理することは出来ない。これは設備を常に拡張できる地上システムとは違い、STICS 特有である。このような環境において、トラヒックが多いほど効果が高くなる本制御は有用な手段となり得る。

## (2) 待ち時間制御特性 (接続長待ち時間優先制御;PCLWC)

接続長待ち時間優先制御は、待ち時間が長い端末ほど接続できる可能性が高くなるようにする優先制御である。最初に発呼して通話失敗した時刻からの経過時間を計測し、この時間が長い端末ほど待ち時間が長い端末とみなして優先度を高くする制御である。具体的には、

$$\text{優先バイアス値} = \text{待ち時間[s]} \times \text{制御パラメータ} \dots \text{(式 22)}$$

として、待ち時間に制御パラメータを掛け合わせた値を優先バイアス値にして、この優先バイアス値の大きい端末ほど優先して接続されるよう制御する。

制御パラメータは任意に設定可能で、制御パラメータが大きいほど、優先バイアス値が大きくなるので強い制御となる。

図 5.5-2 に接続長待ち時間優先制御を実施したシミュレーション結果を示す。図 5.5-2 において横軸は接続長待ち時間優先制御の制御パラメータ、縦軸は経過時間後通話成功に至った端末の平均待ち時間を示している。接続長待ち時間優先制御の制御パラメータを大きくするほど待ち時間を少なくできることが確認された。制御パラメータ値  $1 \times 10^{-4}$  と  $2 \times 10^{-3}$  とを比較すると制御パラメータ  $2 \times 10^{-3}$  条件時に待ち時間を 45% 少なくできる。このように平均待ち時間を制御パラメータによって制御できる。

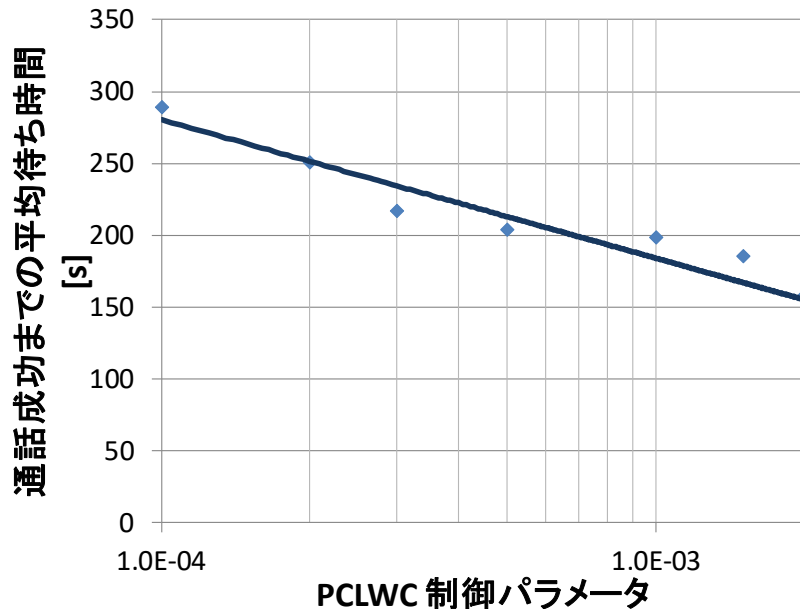


図 5.5-2 接続長待ち時間優先制御(PCLWC)のシミュレーション結果

文献[32],[34]では、保留時間を規制する研究がある。保留時間を固定とした場合、待ち時間を計算することができるため、回線がすべて使用中であっても、接続は保ったまま待ち状態としたのち、空き回線となったら通話する待時式モデルでサービスできる。接続できないユーザが再呼を繰り返すことによりトラヒックリソースを奪ってしまう問題[32],[34]に対して有効な手段と考えられる。

(3) 再呼回数制御特性(上限付き再呼受入回数優先制御;PCRCN)

上限付き再呼受入回数優先制御は再呼要求回数が多いほど優先度が高くなる制御である。再呼要求回数に本制御の制御パラメータを掛け合わせた値を優先バイアス値としている。

$$\text{優先バイアス値} = \text{再呼回数} \times \text{制御パラメータ} \dots (\text{式 23})$$

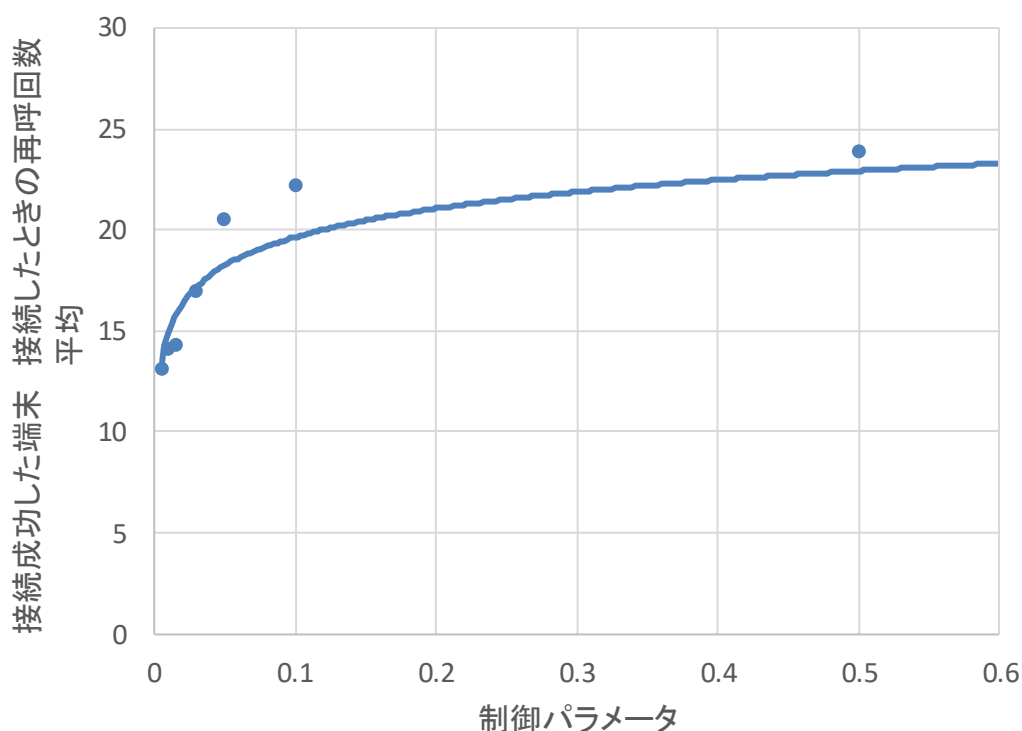


として、再呼回数に制御パラメータを掛け合わせた値を優先バイアス値にして、この優先バイアス値が大きい端末ほど優先して接続される。

制御パラメータは任意に設定可能で、制御パラメータが大きいほど、優先バイアス値が大きくなるので強い制御となる。

図 5.5-3 に再呼回数制御特性を実施したシミュレーション結果を示す。このシミュレーションでは、再呼要求回数による効果を確認するため、再呼要求回数の上限は規定していない。横軸は制御パラメータ、縦軸は接続成功したときの再呼要求回数を示している。

図 5.5-3 から再呼受入回数優先制御の制御パラメータを大きくするほど再呼回数が多い端末が優先されたことが確認された。制御パラメータ値 0.005 と 0.5 を比較すると制御パラメータ 0.5 条件時に再呼回数平均が 1.8 倍高くなることが確認できた。



### 図 5.5-3 上限付き再呼受入回数優先制御(PCRCN) シミュレーション結果

このように再呼回数が多い端末を識別することにより、通話機会の公平性を向上できる。ただし再呼回数が多い端末が優先されることをユーザが知ったとき、再呼を繰り返し、トラヒック環境を悪化する方向に働く場合がある。これを防ぐため、再呼回数の上限を決めて、上限以上は再呼しても受け付けないように制御し、制御していることをユーザに周知するか、端末が自ら再呼出来ないように動作を禁じる設定しておく必要がある。

## 5.6 本章のまとめ

大規模災害時などで通常地上システムを使用している呼が、すべて衛星システムに流入すると、衛星システムの容量は地上システムに比べ極端に少ないため、すぐに飽和状態になる。ここで単に、呼受入制御を行うと、受け付けられなかった通信要求がそのまま再呼し、輻輳に拍車がかかってしまう。大規模災害時の通信バックホールの役割を期待されている STICS では、このような場合でも輻輳によるシステムダウンを回避してユーザの安全・安心のために通信サービスを止めないシステム作りが必要である。

本章ではシステムダウンを回避するだけでなく、通信機会の公平性を重視する呼受入制御（CAC with user satisfaction in fair communication chance, CACFC）で強力な制御をユーザに受け入れやすくし、大規模災害時特有のユーザの通信要求に応える呼受入制御制御を行うことで早期にトラヒックの正常化することを目的とした。

具体的には、通信成功した端末は、通話終了後、一定時間通信要求を発生させない再通信要求不可時間制御（Re-call access suppress time control, RSTC）、長い間接続していない端末を優先して接続する接続長時間待ち優先制御（Priority control for long waiting call, PCLWC）、

通信要求が強い場合は再呼を何回も繰り返すので再呼回数が多い端末を優先して接続するべきであるが、単にそのようにすると再呼回数が増えてしまうため、端末が行える再呼回数の上限値を設定し再呼が増加するのを避ける上限付き再呼回数優先制御（Priority control using retry call number with high upper limit, PCRCN with UL）の3種のCACFC制御を提案した。そして、東日本大震災時の仙台市の携帯電話のトラヒックや基地局の停波状況を模擬した、80万端末が通信要求をするシミュレーション環境を構築し、提案した各制御法の効果を評価した。その結果、各制御法は、ユーザの再通信要求不可時間、接続待ち時間、再呼回数の減少を制御することができ、待ち時間が長いユーザや通信要求が強いユーザを選別して通信を許可できること示した。

衛星移動体通信システムを地上通信システムに接続する統合システムを構築する場合は、地上システムだけの時には経験したことがない輻輳度が高い条件で衛星通信サービスの確保が求められることになる。その際には本研究のような通信機会の公平性を重視した強力な呼受入制御を実装することになると考える。

今後の課題として、提案した3つ制御法を統合して実施する場合の適切な制御あり方や具体的な制御のパラメータをどのようにするかは、災害の規模や被災地が首都である場合などの地域特性も考えながら今後検討していきたいと考えている。

そして、シミュレーションモデルである呼量0.9erlの80万端末がある場合に、発災後数時間以内に最低1通話実施出来るというような具体的な課題に基づいた制御を実施するためには制御パラメータをどのようにすればよいか、また、逆に、ユーザが許容できる再通信要求不可時間、待ち時間、通話時間制御時間などを定義し、衛星通信システムの限られた通信リソースからサービス可能な端末数を求める設計手法を確立することも重要な課題である。

## 第6章 結び

本論文では、一つの携帯端末で地上システムと衛星システムの双方と通信できる衛星／地上共用携帯電話システム（STICS：Satellite/Terrestrial Integrated Communications Systems）実現への課題について研究を行った。

STICS はマルチビーム衛星通信システムである。STICS で使用する MSS バンドは、ITU-R にて地上と衛星の移動体通信向け周波数として規定されている。地上システムとの接続がないマルチビーム衛星通信システムでは、衛星の容量を考慮した上で輻輳が生じないサービス端末数を決定できる。しかし、STICS では一般に普及している地上携帯電話の端末が地上と衛星の両方を使えるのが前提で、衛星の容量をはるかに超える端末数が存在している。これが STIC の大きな特徴である。

この特徴を含有したうえで、通信インフラとして活用するためには、衛星通信リソースを効率よく運用しなければならない。この対策のためトラヒック制御技術に関する研究を以下 2 つの課題について行った。

### （1）デジタルチャネライザを用いた高効率トラヒック制御

STICS 衛星は衛星ビームの帯域幅を任意に変更できるデジタルチャネライザを搭載する。デジタルチャネライザは、ユーザリンクのチャンネルとフィードリンクのチャンネルを交換する機能を持つ。デジタルチャネライザの効率的な運用は周波数の有効利用となると同時にトラヒックフローの極大化につながる。チャネライザ運用制御による高効率トラヒック制御を検討した。

衛星搭載用装置は、衛星リソース配分の枠組みに収まるよう装置規模を抑えることが必要になる。デジタルチャネライザは、変換を1チャンネル単位ではなく、チャンネルを数個まとめたサブバンド単位で行うことで規模を搭載可能レベルにする。

このサブバンド幅が周波数利用率に影響を与えることを示し、周波数利用率向上のためのサブバンド幅の条件について検討した。まず、各ビームの呼量が均一の条件では、フィードリンク帯域幅、ユーザリンク帯域幅をそれぞれサブバンド幅で割った時の剰余が小さい時に効率が良く、最適値を求められることを示した。次に、呼量が少ない海域ビームや呼量が特に多い大規模災害時の被災地ビームを考慮した各ビームの呼量が不均一の条件では、呼量が多い被災地ビームを含むクラスタにはリソースを集中させる必要性から、このクラスタが使用するユーザリンク帯域幅の周波数利用率を高めるため、利用率への寄与度の大きい陸域ビームに割り当てた帯域を無駄なく使い切るサブバンド幅を選択するのがよいこと、さらに、海域ビームは割り当て帯域がサブバンド幅より少ない場合は周波数利用率を下げるので、その帯域を被災地ビームや陸域ビームに割り振ることにより、最終的に周波数利用率を0.98以上にすることができることを示した。

STICSでは、他の衛星移動体通信と違い、災害時には被災地域に衛星リソースを集中する運用を想定している。デジタルチャネライザの運用方法について従来十分な検討がされていないため、本サブバンド幅の検討はチャネライザ運用方法の基本的な条件となり得る。

また、マルチビーム衛星による移動体通信のシステムでは衛星ビームごとに呼量が違うことからデジタルチャネライザの効率的な運用が必須なので本研究が応用可能でとなる。

## (2) 災害時トラヒック急増時の流量制御

大規模地震発生時には被災地への安否確認などにより通信したい

要求が強い通信要求が急増する。しかし、地上システムは、地震による基地局の倒壊や停波が起こり、多くの端末が地上システムを使用できず衛星システムへ通信要求を行う状況であることが予想される。通信容量の数十倍の通信要求があってもシステムダウンを回避して地上通信インフラのバックホールとしての役割を全うする必要性はSTICS 特有の要求である。このため STICS 専用の強力な CAC が必要となる。

衛星の通信容量に合うように受入制御を行うと、通信要求が強い非常に多く通信要求が受け入れられなくなるので、再呼が繰り返えされ、輻輳がさらに増すことになる。そこで、ユーザに受け入れ易いように、通信機会の公平性を重視する呼受入制御 (CAC with user satisfaction in fair communication Chance, CACFC) を 3 種提案した。通信成功した端末は通話終了後一定時間通信要求を発生させない再通信要求不可時間制御、長い間接続していない端末を優先して接続する接続長時間待ち優先制御、再呼回数が多い端末は通信要求が強くと優先して接続するべきであるとし端末が行える再呼回数の上限値を設定・周知した上で優先する上限付き再呼回数優先制御である。そして、シミュレーションにより、各制御法はユーザの再通信要求不可時間、接続待ち時間、再呼回数の減少を制御することができ、待ち時間が長いユーザや通信要求が強いユーザを選別して通信を許可できることを確認した。

STICS に限らず、今後地上システムと衛星システムを接続する際には、大規模災害時に、通信容量の数十倍の通信要求があっても、システムダウンを回避して接続サービスを確保する技術が必要となり、本論文で検討した通話機会の公平性を重視した CAC が応用できると考える。

## 第7章 謝辞

本論文を執筆するにあたり、皆様の様々なご指導やご支援をいただきました。ここに深く感謝の意を表したいと思います。

主任指導教員の電気通信大学大学院情報理工学研究科客員教授の岡田和則先生には、論文の内容のみならず、執筆上の要点や事務手続きに至るまで、さまざまな要件に関してご指導及びお力添えをいただきました。

指導教員の電気通信大学大学院情報理工学研究科 加藤聰彦教授、同じく電気通信大学大学院情報理工学研究科准教授 大坐畠智先生におかれましては、本研究の内容、論文の取りまとめ方、研究内容の整理などについての的確にご指導及びご助言をいただきました。

電気通信大学大学院情報理工学研究科 長岡浩司教授および電気通信大学大学院情報理工学研究科 本田弘樹教授には、本論文の取りまとめにあたり有用なご助言をいただきました。

ご指導いただきました先生方に深く感謝いたします。

本論文作成に先立ち、電気通信大学大学院入学への道筋をつけていただいた情報通信研究機構ワイヤレスネットワーク総合研究センター宇宙通信研究室 豊嶋守生研究室長には、投稿論文の採録に行き詰まっているときに励ましのお声がけをいただきました。同じく情報通信研究機構ワイヤレスネットワーク総合研究センター宇宙通信研究室主任研究員 三浦周様には、論文の書き方の基本からご助言いただき、さらに継続して研究できるよう支援をしていただきました。東洋大学工学部電気電子情報工学科 藤野義之教授には、情

報通信研究機構に在籍していた際から STICS 研究を主導され、本論文の研究テーマの元となる課題を授けていただきました。東洋大学に移られてからも論文の進捗を気にかけていただきました。

ご支援いただきました皆様に深く感謝いたします。



## 第8章 参考文献

- [1] 蓑輪正, 田中正人, 浜本直和, 藤野義之, 西永望, 三浦龍, 鈴木健治, “安心・安全のための地上/衛星統合移動通信システム,” 信学論(B), Vol. J91-B No. 12, pp 1629-1640, 2008.
- [2] 藤野 義之, 三浦 周, 辻 宏之, 浜本 直和, “災害対策のための地上衛星共用携帯電話システム,” 信学論(B) Vol.J95-B, No.3 pp. 237-242, 2012.
- [3] 佐藤大輔, “災害時における整理券輻輳制御法,” 信学会ソサイエティ大会講演論文集, S-36,S-37 Sep. 2013
- [4] 門脇直人, 豊嶋守生, 三浦周, 山本伸一, 高橋卓, 吉村直子, 辻宏之, 滝沢賢一, 高山佳久, 宗正康新, “新たな広がりを見せる衛星通信技術の最新動向,” 信学論(B), Vol.J97-B No.11 pp. 979-991 2014.
- [5] 門脇直人, 吉村直子, 高橋卓, 鈴木龍太郎, “超高速インターネット衛星 (WINDS) における衛星搭載交換技術の開発,” 信学論(B), Vol.93-B No.8 pp. 1035-1042 2010.
- [6] Mansour, N. A., “RF predictions and modeling for microcells and PCS cell design,” Proc. of 44th IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 1745-1749, June 1994.
- [7] HAN, C. C., “A multifeed offset reflector antenna for the Intelsat V Communications Satellite,” Proc. of 7th IEEE European Microwave Conference, pp. 343-347, 1977.
- [8] T. C. Butash and J. R. Marshall, “Leveraging Digital On-Board Processing to Increase Communications Satellite Flexibility and Effective Capacity,” Proc. of ICSSC-2010, AIAA2010-8715 2010.
- [9] R. Kumar, D. Taggart, R. Monzingo and G Goo, “Wideband gapfiller satellite (WGS) system,” Proc. of IEEE Aerospace Conference, pp. 1410-1417, 2005.
- [10] 三浦周, 辻宏之, 遠藤邦夫, 藤野義之, 豊嶋守生, “地上/衛星共用電話システムの収容局数評価について,” 信学技報, SAT2013-19, 2013
- [11] “ligado networks,” <https://ligado.com/services/technology-capabilities/satellite/> <参照

2018年11月26日>

- [12] “EchostarMobile,” <http://echostarmobile.com/about.aspx#satellites> <参照 2018年11月26日>
- [13] 三浦周, 渡邊宏, 浜本直和, 辻宏之, 藤野義之, 鈴木龍太郎, “地上/衛星共用携帯電話システムの地上-衛星間周波数共用に向けた屋外/屋内干渉模擬実験,” 信学論(B) Vol.J95-B, No.5 pp. 677-688, 2012.
- [14] 三浦周, 渡邊宏, 浜本直和, 藤野義之, 鈴木龍太郎, “地上/衛星共用携帯電話システムの衛星上り回線干渉量についてマルチビーム衛星回線と地上回線の同一周波数共用のための基礎的解析,” 信学会技術研究報告. SAT, 衛星通信, 109.427:pp. 37-42 Feb. 2010.
- [15] 大嶺裕幸; 井上貴裕, “100 ビーム級マルチビームエッジカバレッジの高利得化検討,” 信学会技術研究報告. A・P, アンテナ・伝播 107.431: pp. 27-32, Jan. 2008
- [16] LEE, Jiwoong; HAN, Youngnam, “Downlink admission control for multimedia services in WCDMA,” Proc. of IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, The 13th International Symposium. pp. 2234-2238, 2002.
- [17] Xin Ge, Gongliang Liu, Hongdan Wang, “Call admission control scheme for IDMA-based multi-beam satellite systems in the downlink direction,” Proc. of 6th International ICST Conference IEEE Communications and Networking in China (CHINACOM), pp. 609-613, Aug. 2011.
- [18] 入江恵, “総務省 大規模災害等緊急事態における通信確保のあり方に関する検討会ネットワークインフラ WG(第2回)配布資料東日本大震災 資料 2-1 2011年6月9日  
[http://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/kenkyu/saigai/45183\\_2.html](http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/saigai/45183_2.html). <参照 2015年5月1日>
- [19] 戸花洋貴, 平栗健史, 吉野秀明, “災害型輻輳に対する電話予約制御方式と評価(コミュニケーションクオリティ),” 信学技報 114(131), pp. 35-38, 2014.
- [20] 浅野大樹, 高橋志学, 平栗健史, 吉野秀明, “災害時の予約型電話輻輳制御方式の改善と評価, 信学会総合大会講演論文, 集 pp. 405, 2016.
- [21] 3GPP TS22.011 V13.1.0: “Technical Specification Group Services and System Aspects; Service accessibility,” Release 13, 2014.

- [22] 青柳健一郎, ウリ A.ハプサリ, 田中威津馬, 竹田晋也, “LTE-Advanced のさらなる発展に向けて—Release12 標準化動向—LTE/LTE-Advanced システムにおけるアクセスクラス制御技術,” NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル, Vol. 23 No.2.
- [23] Jain, R., Chiu, D., and Hawe, W., “A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems.,” DEC Res. Rep. TR-301, Sept. 1984
- [24] Bisio, Igor, and Mario Marchese. "The concept of fairness:definitions and use in bandwidth allocation applied to satellite environment." IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine 29.3, pp. 8-14, 2014.
- [25] Cocco, Giuseppe, et al. "Radio resource management strategies for DVB-S2 systems operated with flexible satellite payloads." 8th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 14th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC), pp. 1-8, 2016.
- [26] Z Wang and L Ji, “Radar Signal Interception Receiver based on Digital Channelizer,” Proc. of ICSP2012, pp. 1764-1767, Aug. 2012.
- [27] 三浦周, 織笠光明, 辻宏之, 藤野義之, 小石洋一, 小林直樹, 熊谷健夫, 松崎敬臣, “地上/衛星共用携帯電話システム用 DBF/チャネライザの開発,” 信学論(B), Vol. J97-B. No.11 pp. 1032-1042 Nov. 2014.
- [28] 小宮山典男, 三浦周, 織笠光明, 藤野義之, “リソース割当再構成技術 (DBF/チャネライザ)の開発,”情報通信研究機構研究報告, Vol.61, No.1, pp. 129-139, 2015.
- [29] NTT 東日本, “東日本大震災における 復旧活動の軌跡,” 2011 年 11 月. [https://www.ntt-east.co.jp/info/detail/pdf/shinsai\\_fukkyu.pdf](https://www.ntt-east.co.jp/info/detail/pdf/shinsai_fukkyu.pdf)<参照 2018年11月26日>
- [30] 坂野 寿和, “情報通信ネットワークの耐災害性向上に関する一考察,” 信学技報. PN, フォトニックネットワーク 112(87), pp. 67-72, Jun. 2012.
- [31] 岡田和則, “災害等における携帯電話の通話時間規制の検討,” 信学技報. RCS, 無線通信システム, 100(278), pp. 81-86, Sep. 2000.
- [32] 岡田和則, “大規模災害時等における重要通信確保のための通信時間規制の提案 (リッチメディア,信頼性・セキュリティ,一般),” 信学技報. CQ, コミュニケーシ

- ョンクオリティ 103(177), pp. 13-18, Jul. 2003.
- [33] 深井健一, 岡田和則, 大野浩之, “災害時における携帯電話の通信時間規制による再呼への受付規制の効果,” 信学技報.A・P, アンテナ・伝播 101(681), pp. 31-38, Mar. 2002.
- [34] 高橋敬隆, 四方義昭, 岡田和則, 小松尚久, “携帯電話システムにおける保留時間規制方式のトラヒック解析: サービス時間制限のある即時式モデル,” 信学技報 情報ネットワーク 106(42), pp. 79-84, May 2006.
- [35] 足立恵理子, 相田仁, “災害時におけるトラヒックモデルと通信確保手法について,” 信学技報 111(346), pp. 13-18, Dec. 2011.
- [36] 佐藤大輔, “災害時における整理券輻輳制御法,” 信学会ソサイエティ大会論文集,基礎・境界, "S-36"- "S-37", Sep. 2013
- [37] 株式会社 NTT ドコモ, “東北地方太平洋沖地震への対応状況(復旧計画)について,” 2011年3月30日  
[https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/ir/binary/pdf/library/presentation/110330/notice\\_110330-2.pdf](https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/ir/binary/pdf/library/presentation/110330/notice_110330-2.pdf). <参照 2018年11月26日>
- [38] 電波法関係審査基準 別紙2(第5条関係)無線局の目的別審査基準第2 陸上関係, 1 電気通信業務用(16)  
[http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000007822.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000007822.pdf). <参照 2017年8月27日>
- [39] 田辺和輝, 宮田純子, 馬場健一, 山岡克式, “緊急時回線留保制御における到着呼量に基づく閾値設定法,” 信学技報 CQ, コミュニケーションクオリティ, 114(298), pp. 83-88, Nov. 2014.
- [40] 株式会社 NTT ドコモ, “LTE の要求条件”  
<https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/rd/tech/lte/lte04/04/01.html>. <参照 2018年11月28日>

## 第9章 関連論文

1. 「STICS 衛星におけるチャネライザサブバンド幅検討と効果」 ……電子情報通信学会論文誌B, VOL.J100-B NO.8, pp.548-557, (2017年8月).

(本文第4章)

2. 「A Study of Call Admission Control in Satellite / Terrestrial Integrated Communications System during Large-Scale Disaster」 ……Proceeding of the 29th International Technical Conference on Circuit/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC2014), pp. 803-806, Phuket, THAILAND, Jul. 2014.

(本文第5章)