

低軌道周回衛星における衛星回線の大容量化に関する研究

| | |
|--------|---|
| 著者 | 谷 重紀 |
| 学位授与機関 | Tohoku University |
| 学位授与番号 | 11301甲第17790号 |
| URL | http://hdl.handle.net/10097/00122851 |

博士学位論文

低軌道周回衛星における衛星回線の大容量化に関する研究

東北大学大学院情報科学研究科

応用情報科学専攻

谷 重紀

Broadband Transmission Techniques for Low Earth Orbit Satellite Data Links

ABSTRACT:

On the back of unpredicted climate change, wide area monitoring system utilizing earth observation satellite contributes to environmental assessment and quick response to natural disasters. Nowadays, these kind of satellites implement onboard higher resolution sensors such as electro-optical, synthetic aperture radar and a huge amount of data storage. Furthermore, the near real time monitoring by means of a constellation of a plurality of earth observation satellites is expected. This kind of system requires not only a rapid image processing but also the rapid data transfer to the ground station.

Currently, X band transmitter is widely used, and its data rate reaches approximately 1Gbit/s. However, it is difficult to increase the data rate because of bandwidth limitations. The International Telecommunication Union (ITU) allocates four times more bandwidth in the Ka band for remote sensing downlink, thus, Ka band transmitters have been studied and developed in recent years. Furthermore, Q band which has 3GHz of bandwidth is also anticipated for higher speed transmission. In addition, multi-layered networks by integrating low earth orbit and geostationary orbit have been proposed. These works distribute traffic to each hierarchical satellite layer so as to mitigate congestion in specific areas while keeping quality of service.

The data rate of satellite-to-ground transmission can be increased utilizing higher frequencies due to higher antenna gain and wider bandwidth. On the other hand, atmospheric attenuation also increases especially at low elevation angle. In order to overcome atmospheric attenuation, site diversity is one of the popular techniques to improve system availability. Furthermore, resource allocation is well investigated to improve frequency efficiency and quality of service. In particular, Adaptive Coding and Modulation (ACM) or Variable Coding and Modulation (VCM) is key technology which selects appropriate coding rate and modulation scheme based on Signal to Noise power Ratio (SNR) to satisfy the required error rate.

However, if the remote sensing system migrates from current X band transceivers to higher frequency transceivers such as Ka or Q band, receiving SNR varies dynamically depending on position relationship among satellite and ground receivers because the SNRs are affected by the transmission beam pattern. Additionally, the ITU allocates Q band for remote sensing

as a secondary user, the remote sensing satellite is required to follow interference criteria to protect primary users such as terrestrial networks.

Furthermore, even though the satellite-to-ground link enables higher transmission because of the small path loss relative to geostationary orbit, the communication duration is limited in a visible area. Therefore, the observation satellite is unable to transmit all of the observed data if the satellite stores more data than the size of transmittable.

To deal with aforementioned, this paper proposes the adaptive beam control technique in order to maximize SNR of satellite ground station over the entire elevation angle and minimize interference to terrestrial networks. In the proposed method, the controller estimates SNRs of ground stations based on the position relationship between satellite and ground stations, also it estimates interference to the terrestrial networks. Then, it updates beam pointing, antenna rotation angle, and candidates of ground stations to receive data from the satellite based on the SNR and interference.

Furthermore, this paper proposes multi-carrier and multi-hop transmission technique to improve successive transfer ratio for earth observation satellite constellation. In the proposed method, once the satellite produces observed data, the controller estimates the amount of transmittable data for each of the satellites which can communicate with the ground station. Thereafter, it selects suitable destination satellites and paths of inter-satellite link to send all required data to ground stations.

In addition, this paper proposes multi-carrier and multi-mode transmitter which is able to switch wideband mode and power combining mode flexibly to realize the multi-carrier and multi-hop transmission technique described above. Also, effectiveness of the proposed method is validated through the prototype experimentation.

Finally, this paper proposes an enhanced flexible HTS system for a multi-layered network which consists of a digital channelizer and multiple gateways to respond to traffic demand explosion in a specific area. In the proposed method, required user link bandwidths for each of the beams are calculated based on the traffic demand and link condition, then available feeder-link bandwidths for each of the gateways are calculated based on the required bandwidths at neighboring user-link beams, finally the optimal pair of gateways are selected to assign maximum bandwidth.

This paper is organized as follows. After an introduction in Section I, Section II describes

relevant research works about LEO network and analyzes communication performances for earth observation satellite constellation. Section III introduces our proposed beam control technique which maximizes diversity gain and mitigates interference to terrestrial networks. In addition, simulation results of SNR performance for the remote sensing satellite network and an availability performance for the terrestrial networks are presented. Section IV introduces our proposed multi-carrier and multi-hop transmission method and multi-carrier and multi-mode transmitter to realize real time transmission for low earth orbit satellite networks. Also, effectiveness of the proposed method is validated through the simulation and prototype experimentation. In addition, an enhanced flexible HTS system for a multi-layered network is presented. Finally, this paper is concluded in Section V.

目次

| | | |
|--------|--------------------------------|----|
| 第1章 | 序論 | 1 |
| 1.1. | 研究背景 | 1 |
| 1.2. | 研究の目的 | 2 |
| 1.3. | 本論文の構成 | 3 |
| 第2章 | 低軌道周回衛星におけるデータ伝送 | 5 |
| 2.1. | 緒言 | 5 |
| 2.2. | 低軌道周回衛星を利用したシステム | 6 |
| 2.3. | 従来の衛星-地球局間データ伝送方式 | 8 |
| 2.4. | システムモデル | 15 |
| 2.5. | 結言 | 19 |
| 第3章 | ダイバーシチゲイン最大化と周波数共有を両立するビーム制御方式 | 21 |
| 3.1. | 緒言 | 21 |
| 3.2. | ダイバーシチゲインを最大化するビーム制御方式 | 22 |
| 3.2.1. | 提案手法 | 22 |
| 3.2.2. | 評価 | 27 |
| 3.3. | システム間周波数共有に関する検討 | 34 |
| 3.3.1. | 提案手法 | 34 |
| 3.3.2. | 評価 | 38 |
| 3.4. | 結言 | 42 |
| 第4章 | 低遅延データ伝送を実現する衛星間中継伝送 | 43 |
| 4.1. | 緒言 | 43 |
| 4.2. | マルチキャリア・マルチホップ方式による低遅延データ伝送 | 45 |
| 4.2.1. | シミュレーション評価 | 49 |
| 4.3. | マルチキャリア・マルチモード変調器の試作開発 | 56 |
| 4.3.1. | 試作評価 | 59 |
| 4.4. | 局所的なトラヒック増大に対する周波数割当法 | 65 |
| 4.4.1. | システムモデル | 65 |
| 4.4.2. | 提案方式 | 68 |
| 4.4.3. | 評価 | 74 |
| 4.5. | 結言 | 79 |
| 第5章 | 結論 | 81 |

| | |
|--------------|----|
| 謝辭..... | 83 |
| 著作物利用許諾..... | 85 |
| 参考文献..... | 89 |
| 研究業績..... | 97 |

図目次

| | |
|--|----|
| 図 2-1 衛星高度の違い..... | 6 |
| 図 2-2 太陽同期準回帰軌道..... | 7 |
| 図 2-3 観測衛星システムの構成例..... | 8 |
| 図 2-4 降雨減衰対策技術..... | 10 |
| 図 2-5 39GHz 帯の国内周波数割り当て..... | 13 |
| 図 2-6 システムモデル..... | 15 |
| 図 2-7 衛星と地球局との位置関係..... | 19 |
| 図 3-1 周波数帯とアンテナ利得の関係..... | 23 |
| 図 3-2 衛星位置とビームパタンとの関係..... | 24 |
| 図 3-3 ビーム制御方式の動作例..... | 26 |
| 図 3-4 単局受信とサイトダイバーシチ適用時における不稼働率特性..... | 27 |
| 図 3-5 仰角対降雨減衰量特性..... | 28 |
| 図 3-6 仰角対平均 SNR 特性 (単局指向)..... | 29 |
| 図 3-7 仰角対平均 SNR 特性 (中間指向)..... | 29 |
| 図 3-8 仰角対平均 SNR 特性 (ビーム制御)..... | 30 |
| 図 3-9 各仰角における送信アンテナビーム幅とアンテナゲインとの関係..... | 30 |
| 図 3-10 仰角対正規化 SINR 特性(ビーム中心指向の場合)..... | 31 |
| 図 3-11 仰角対正規化 SNR 特性(ビーム制御適用時)..... | 32 |
| 図 3-12 SNR の CCDF..... | 33 |
| 図 3-13 周波数利用効率の CDF..... | 34 |
| 図 3-14 ビーム制御例..... | 35 |
| 図 3-15 ビーム制御法の動作概要..... | 36 |
| 図 3-16 評価モデル..... | 39 |
| 図 3-17 仰角対アンテナ利得..... | 39 |
| 図 3-18 稼働率特性..... | 40 |
| 図 3-19 受信 SNR 特性..... | 41 |
| 図 3-20 稼働率及び SNR 低下量..... | 41 |
| 図 3-21 SNR の CCDF..... | 42 |
| 図 4-1 提案方式の動作概要..... | 46 |
| 図 4-2 衛星構成..... | 46 |
| 図 4-3 データ伝送例..... | 47 |
| 図 4-4 伝送量と伝送確率の定義..... | 50 |
| 図 4-5 送信時間対送信データサイズ特性..... | 51 |
| 図 4-6 伝送容量対地上局数特性 (a) $N_d=8$ | 52 |

| | |
|---------------------------------------|----|
| 図 4-7 伝送容量対地上局数特性 (b) $N_d=16$ | 52 |
| 図 4-8 伝送容量対地上局数特性 (c) $N_d=32$ | 53 |
| 図 4-9 伝送容量対地上局数特性 (d) $N_d=64$ | 53 |
| 図 4-10 伝送確率対地上局数特性 (a) $N_d=8$ | 54 |
| 図 4-11 伝送確率対地上局数特性 (b) $N_d=16$ | 54 |
| 図 4-12 伝送確率対地上局数特性 (c) $N_d=32$ | 55 |
| 図 4-13 伝送確率対地上局数特性 (d) $N_d=64$ | 55 |
| 図 4-14 マルチキャリア・マルチモード変調器の概略図 | 56 |
| 図 4-15 マルチキャリア・マルチモード変調器の送信制御例 | 57 |
| 図 4-16 機能ブロック | 58 |
| 図 4-17 ハードウェア構成 | 59 |
| 図 4-18 実機構成 | 60 |
| 図 4-19 コンステ，スペクトラム特性 | 61 |
| 図 4-20 EVM 特性 | 62 |
| 図 4-21 電力特性 | 63 |
| 図 4-22 HTS のシステム構成 | 66 |
| 図 4-23 HTS のビーム配置例 | 66 |
| 図 4-24 衛星通信システムの制御コンセプト | 69 |
| 図 4-25 周波数プランの比較 | 70 |
| 図 4-26 デジタルチャネライザの構成 | 71 |
| 図 4-27 従来法における周波数割当 | 76 |
| 図 4-28 提案法における周波数割当 | 76 |
| 図 4-29 システムスループット特性 | 77 |
| 図 4-30 被災地をカバーするビームのスループット特性 | 78 |
| 図 4-31 ビームスループット特性 | 79 |

表目次

| | |
|--------------------------------------|----|
| 表 2-1 観測衛星コンスタレーションの例 | 6 |
| 表 2-2 直接伝送系の研究開発動向 | 9 |
| 表 2-3 観測衛星システムに対する周波数割り当て | 11 |
| 表 2-4 TDP#5 のシステム諸元..... | 11 |
| 表 2-5 39GHz 帯付近を利用する主なシステム | 13 |
| 表 3-1 評価条件..... | 38 |
| 表 4-1 評価条件..... | 49 |
| 表 4-2 機能・諸元..... | 58 |
| 表 4-3 評価条件..... | 59 |
| 表 4-4 DVB-S2X における MODCOD テーブル | 63 |
| 表 4-5 要求スループット..... | 75 |



第1章 序論

1.1. 研究背景

急速な経済発展と人口増に伴い、これまで予期されなかった気象変化が地球規模で生じている。これら気象変化を高精細且つ高頻度に観測することは、自然災害が生活に与えるリスクを低減するうえで重要である。近年は、観測衛星に光学や合成開口レーダによる高精度なセンサを備え、また大量の観測データを蓄積する大容量記憶域を搭載する傾向にある。さらに、低軌道を周回する複数の観測衛星から構成される観測衛星コンスタレーションが、準リアルタイムモニタリングの実現に向けて期待されている。このようなシステムは、高速な画像処理に加え、観測データを迅速に地球局へ伝送する高速データリンクが要求される[1]。

観測衛星のデータリンクは、データ中継衛星を経由する手段と、観測衛星から地上局へ直接伝送する手段がある。ここで、観測衛星は静止軌道に配置されることから、少なくとも3機以上のデータ中継衛星があれば、観測衛星は地球上のいかなる場所においても地上局と通信を確立することができる。しかし、データ中継衛星は観測衛星を追尾するための大口径アンテナが必要となり、同時接続数は1乃至2局に限定される。一方、直接伝送回線は静止軌道と比較して距離減衰が小さいことから高速伝送が可能である。従来はX帯によるデータ伝送が広く用いられ、800Mbit/sの伝送が実現されているが、伝送速度の更なる向上に対しては帯域幅が制約となる[2], [3]。そこで、X帯(8GHz帯)と比較して4倍の帯域幅(1.5GHz)を利用可能なKa帯(26GHz帯)を用いた直接データ伝送が検討されている[4], [5]。更には、3GHzを利用可能なQ帯(39GHz帯)の利用により更なる伝送速度の向上が期待されている[6]。

Ka帯やQ帯などの高い周波数帯を用いることで、アンテナ利得と利用可能帯域幅が増加するため、観測衛星から地球局へのデータ伝送速度の向上が可能となる。一方で、降雨など大気による減衰も増加し、特に低仰角は大気通過距離が長いため、影響度が大きい。上記減衰に対し、サイトダイバーシチ技術は高稼働率化の観点で有効であり、実験による有効性が示されている[7]。また、受信SNR (Signal to Noise power Ratio)に応じて所望の誤り率を

満たす変調方式と符号化率を選択する適応変調技術を用いることで周波数利用効率の向上が期待できる[8], [9]. しかし, X帯からKa帯やQ帯への移行に際して, インフラ設備コストの観点から同一の送受信局を流用した場合, 高周波化に伴いアンテナパタンが狭域になるため, 受信SNRは観測衛星と地球局との位置関係に応じて変動するという課題がある. また, Q帯の利用に際し, 観測衛星は二次利用者として割り当てられているため, 地上無線システムなどの一次利用者への干渉を規定値未満にしなければいけないという課題がある[10].

さらには, 地球局との通信可能時間は, 衛星と地球局との可視範囲に限定されるのに加え, 衛星と地球局との位置関係(すなわち仰角)に依存して回線品質が変動することから伝送速度は送信機会ごとに変化するため, 観測衛星は送信可能データサイズ以上のデータを蓄積している場合に, 全てのデータを伝送できず, 送信待ち時間が発生する可能性がある. 衛星ネットワークの研究はイリジウム等の通信衛星を対象として多くなされており, 低軌道周回衛星のみを対象としたネットワークに加え, 中軌道や静止軌道衛星と組み合わせたハイブリッドネットワークの研究が行われている[11]-[18]. しかし, 通信衛星は地球全域をほぼカバーするのに対し, 先行研究は観測衛星のように可視時間が限定された条件は考慮されていない. また, 観測衛星は一度に数百 Gbit の観測データを生成することから, 先行研究で広く用いられる Store-and-forward 型プロトコルのようにキュー内滞留遅延が増大する方式を用いずに中継することが望ましい. さらには, 自然災害等を想定した場合, 被災地周辺に集中して通信・観測需要が高まることが想定されるため, 地理的な通信需要の局所集中に対応したデータリンクの確立が重要となる.

そこで, 本研究ではこれらの課題を解決するため, 衛星から地球局へのデータ伝送方法及び衛星間データ伝送方法をお互いの位置関係やデータ滞留量に応じて適応的に制御することで, 低軌道周回衛星のネットワーク全体における通信品質と伝送容量の最適化を図る.

1.2. 研究の目的

本研究では, 低軌道周回衛星ネットワークにおいて, 自システムの回線容量増大と, 他システムへの与干渉量低減を実現するための, 衛星-地球局間及び衛星間伝送制御方式を確立することを目的とする.

本研究の特色は、衛星-地球局間の回線容量増大と与干渉量低減の双方を実現する点と、複数の衛星及び地球局を連携制御する点にある。先行研究では、地理的に離れた二つの地球局が同時に衛星からデータを受信することで確率的に降雨減衰の影響を低減するサイトダイバーシチ技術や、システム間で異なる偏波を用いることで干渉を低減する手法が検討されているが、回線容量増大と与干渉量低減の双方を考慮した制御は確立されていない。また、複数の衛星間における経路制御により回線容量を増大する提案もなされているが、複数の地球局も含めた連携制御は他の研究にはみられない本研究独自のものである。

本研究の完遂により、衛星回線の大容量化と与干渉量低減を可能とする衛星-地球局間及び衛星間伝送制御方式が確立されれば、低軌道を周回する観測衛星に搭載する観測機器の高度化に伴い高精細な観測データを高頻度に地球局へ伝送することが可能となる。さらには、衛星システムと同一の周波数を用いる地上通信システム数が増大した場合においても、与干渉量を制御することで、同一周波数内でのシステム共存が可能となる。

1.3. 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。はじめに 2 章において、低軌道周回衛星におけるデータ伝送方式の先行例を示すと共に、本論文が想定するシステムモデルと解決すべき課題を示す。3 章では、衛星-地球局間データ伝送の高速化と高信頼化を目的に、降雨減衰時におけるダイバーシチゲインの最大化と、衛星システムと地上システムとの周波数共用を両立する動的ビーム制御方式を提案し、計算機シミュレーションによる評価結果を示す。4 章では、さらに複数の衛星による高頻度観測を想定し、衛星が取得したデータを準リアルタイムに伝送する衛星間中継伝送方式の提案と評価結果、ならびに、本提案内容を具現化する変調器の試作評価結果について示す。また、局所的な観測・通信需要の増大に対処可能な周波数制御方式を提案し、計算機シミュレーションによる評価結果を示す。最後に本論文の結論を 5 章に示す。

第2章 低軌道周回衛星におけるデータ伝送

2.1. 緒言

本章では、低軌道周回衛星を利用したシステムの概要と、想定課題について示す。

人工衛星を用いたシステムは衛星軌道の特徴に応じて通信、放送、観測等に類別される。特に、低軌道は、2000年代初頭に Iridium 等の通信衛星が実用化され、今日でも運用が継続されている。また、科学的知見向上を目的として多種多様な観測衛星が世界中で運用されている。しかし、低軌道は静止軌道と比較して距離減衰の観点で優位性があるものの、地球を周回するため、網羅性を確保するためには複数の衛星を打ち上げる必要があり、投資対効果の観点で普及上の課題があった。一方、近年は衛星製造技術等の進展により低コスト化が図れるようになってきている。さらに、観測衛星は従来科学目的で利用されていたのに対し、宇宙分野の技術革新と、宇宙以外との情報通信技術の融合による新規ビジネスの創出が期待されており、特に複数の情報を地理空間上にマッピングして新たな情報を得る Geospatial Intelligence (GEOINT) の概念が注目されている。例えば、石油タンクの備蓄量を衛星で監視することで世界中の備蓄量を推定するビジネスや、農業分野では、穀物の生育状態を監視する用途や、水産業では、赤潮などの海洋環境の変化を監視する用途に衛星を用いることが計画されている[25]。これら新たな取り組みを背景に、2016年には民間企業の宇宙活動の進展を法的に整備するため、「人工衛星等の打上げ及び人工衛星の管理に関する法律」、「衛星リモートセンシング記録の適正な取扱いの確保に関する法律」が成立しており、今後は観測衛星に対する期待がさらに増加するものと考えられる。

上述した背景を踏まえ、以下では低軌道周回衛星を利用した観測衛星システムの将来像を見据え、想定される課題を抽出する。2.2章で低軌道周回衛星を利用した観測システムの概要について示した後に、2.3章で衛星-地球局間データ伝送方式について概観する。特に、伝送容量増大とリアルタイム伝送に対する先行例を分析しつつ、本研究で解決すべき技術

的課題を明らかにする。さらに2.4章では、本論文で想定するシステムをモデル化し、後述する提案方式のアルゴリズム及び評価の基本モデルを示す。

2.2. 低軌道周回衛星を利用したシステム

人工衛星の高度は大きく分けて高軌道(静止軌道)、中軌道、低軌道の3つに分類することができる。静止軌道は高度約36000kmを飛行し、任意の地上から衛星が止まって見えることから、通信衛星、データ中継衛星、放送衛星に広く利用されている。中軌道は高度約8000kmを衛星が地球上を周回する軌道であり、これまで多くは利用されてこなかったが、近年はO3bが低緯度地域に限定した高速衛星通信サービスを開始している。低軌道は高度数100kmから約1000kmで衛星が地球上を周回する軌道であり、静止軌道と比較して距離が短く信号の減衰が少ないことから、衛星通信では小型端末向けサービスに利用されている。また、地球上を周回する本軌道は、地球観測衛星にも適用されている。

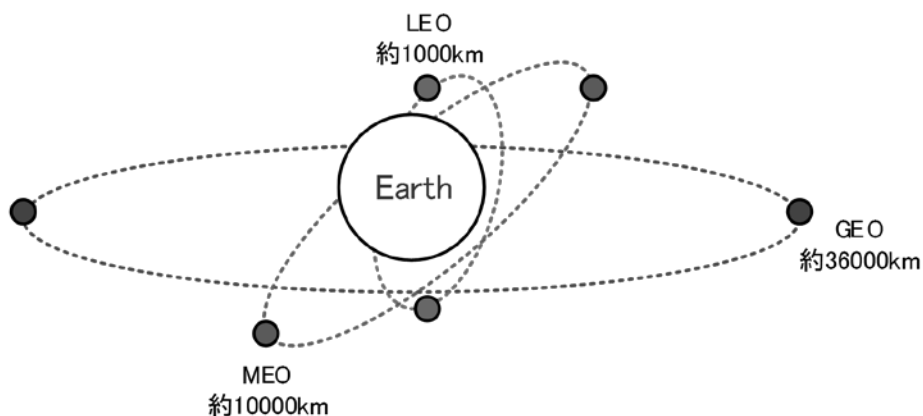


図 2-1 衛星高度の違い

表 2-1 観測衛星コンスタレーションの例

| No | 企業 | 機数 |
|----|-------------------------|----|
| 1 | DigitalGlobe | 6 |
| 2 | Planet Labs (旧 Skybox) | 14 |
| 3 | UrthCast | 16 |
| 4 | EagleView (旧 OmniEarth) | 18 |
| 5 | Blacksky Global | 60 |
| 6 | PlanetLabs | 88 |

観測衛星は、観測機会の周期性と網羅性を確保するため、図 2-2 に示すような太陽同期準回帰軌道を用いることが多い。本軌道は、衛星の軌道面が地球の公転周期と一致しており、定期的(回帰日数)に同一地点に戻ってくる特徴があり、且つ任意の地点の上空を必ず一定の時刻(降交点通過時刻)に通過する特徴がある。すなわち、回帰日数が 14 日、降交点通過時刻が 9 時であれば、地球上の全ての地点を地方時で 9 時に観測でき、且つ同一地点を 14 日周期に観測することが可能となる。本軌道の利点は光学センサの観測条件が一定となることや、太陽光パネルによる電力供給条件が一定になるため、観測計画の立案が容易であることである。一方、図 2-2 に示したように、観測衛星の軌道は地方時が決まっていることから、一つの観測衛星で任意の地点を観測した場合、必ず同じ時間に観測することとなる。つまり、複数の時間帯で任意の地点を観測したい場合は、異なる軌道面に複数の観測衛星を配置する必要がある。よってリアルタイム観測システムを実現するためには、図 2-3 に示すように、観測衛星は同一軌道面もしくは異軌道面に複数の衛星を配置するようにコンステレーションを組む必要がある。

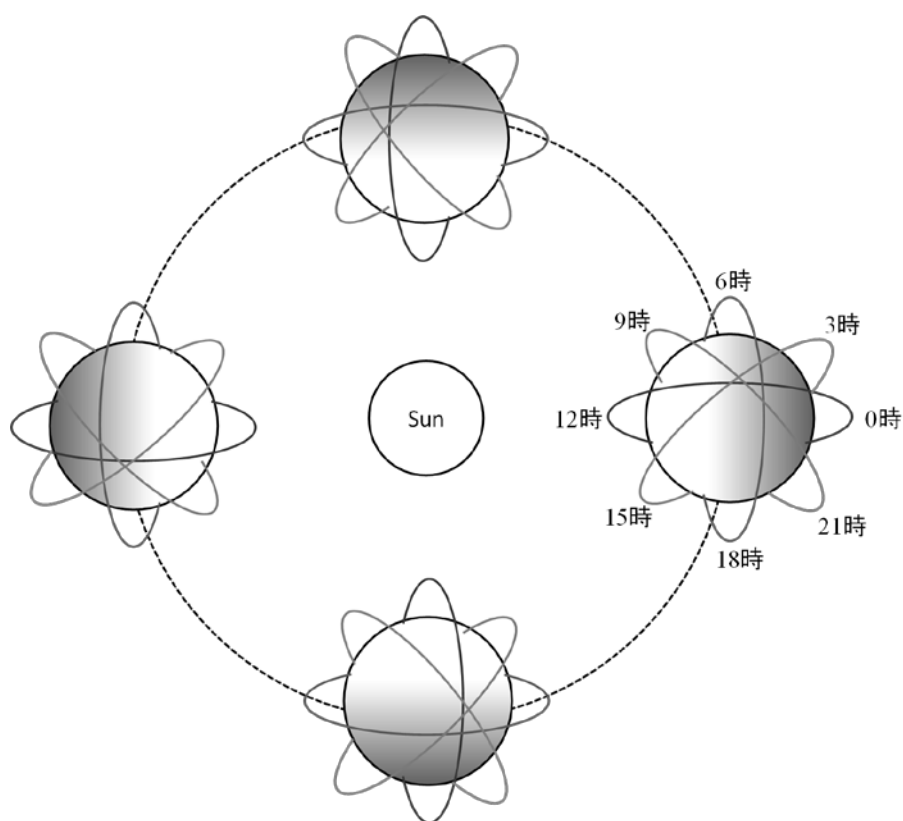


図 2-2 太陽同期準回帰軌道

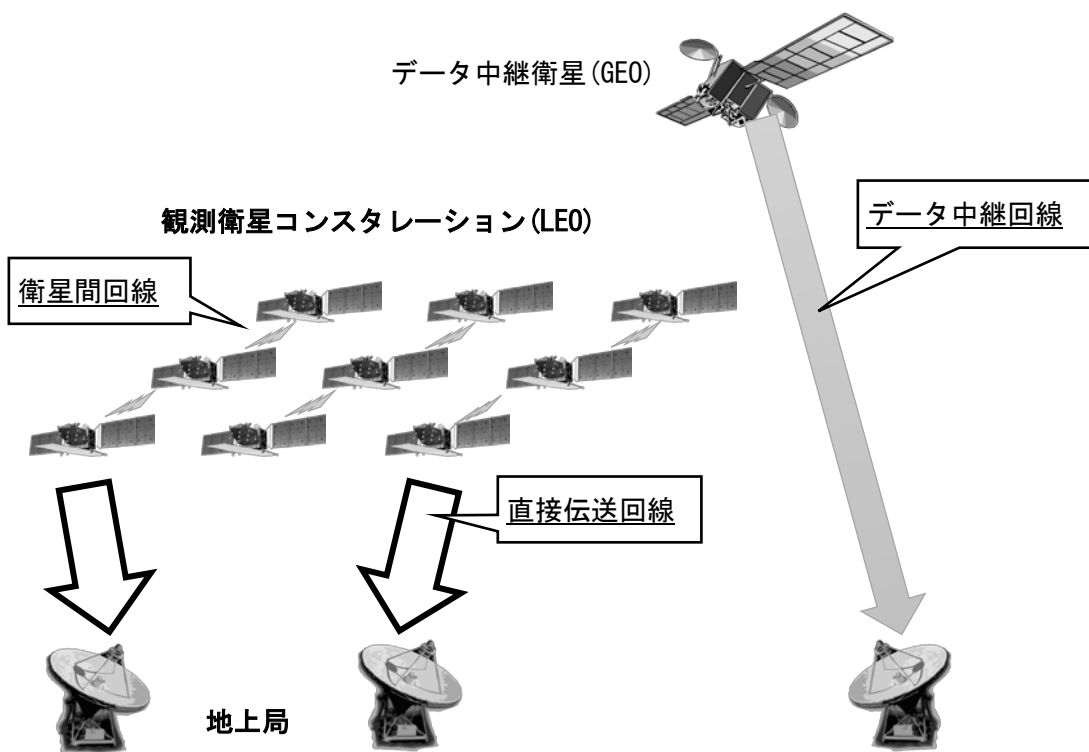


図 2-3 観測衛星システムの構成例

観測衛星は、衛星に搭載するセンサによって観測可能な対象が異なるが、代表的には光学センサと合成開口レーダが用いられている。光学センサは、カラー画像を取得できるため、視認性に優れるものの、雲や夜間などは地表を観測できない。一方、合成開口レーダはマイクロ波の反射を用いることから昼夜を問わず観測が可能である。国内では、「だいち」や「だいち2号」が陸域観測衛星として運用されており、災害監視等で広く活用されている。

2.3. 従来の衛星-地球局間データ伝送方式

IOAG (Interagency Operation Advisory Group)は文献[26]において Ka 帯の直接データ伝送についてまとめており、Ka 帯を利用することで伝送速度が向上し、衛星搭載センサの高精細化と広範囲な観測を可能にすることが示されている。

表 2-2 に 1Gbps を超える直接伝送系の研究開発動向を示す[27]-[33]。実験用である No1

以外のサブシステムが 26GHz 帯を採用し、高速化に対しては多値化、マルチキャリア化(偏波多重含む)の動向が見られる。

表 2-2 直接伝送系の研究開発動向

| No | 製造元 | 型番・名称等 | 最大伝送速度 | 変調方式 | 帯域幅 | 周波数帯 |
|----|------------------|-------------------------------------|----------|--|---------------------------|---------------|
| 1 | L3 | SCRAM | 2.8Gbps | QPSK 8PSK 16APSK 32APSK 64APSK 128QAM | 500MHz | 31-35GHz |
| 2 | L3 | CTK-830 | 1.2Gbps | OQPSK | 800MHz (推定) | 25.5-27.0GHz |
| 3 | TESAT | Next generation downlink subsystems | 2.05Gbps | QPSK 8PSK 16APSK 32APSK 64APSK | 600MHz (Roll-off =0.2) | 25.5-27.0GHz |
| 4 | Space Micro | μ Tx-300 | 1.2Gbps | QPSK OQPSK 8PSK 16APSK 32APSK | 300MHz (推定) | 25.25-27.0GHz |
| 5 | Northrop Grumman | 9Gbps subsystem | 9.0Gbps | QPSK 16APSK | 1.5GHz* 2 キャリア(推定) | 25.5-27.0GHz |

Ka 帯は衛星間通信で既に利用されているが、直接データ伝送への適用は降雨減衰対策が必要であり、特に通信時間の 35%以上を占める仰角 5 度から 10 度での通信品質改善が重要となる。図 2-4 に示すとおり、本課題に対しては適応変調が有効であり、オープンループ

型の VCM (Variable Coding and Modulation) とクローズドループ型の ACM (Adaptive Coding and Modulation) がある。また、複数の地球局で同一データを受信することで降雨減衰による稼働率低減を改善するサイトダイバーシチ技術がある。

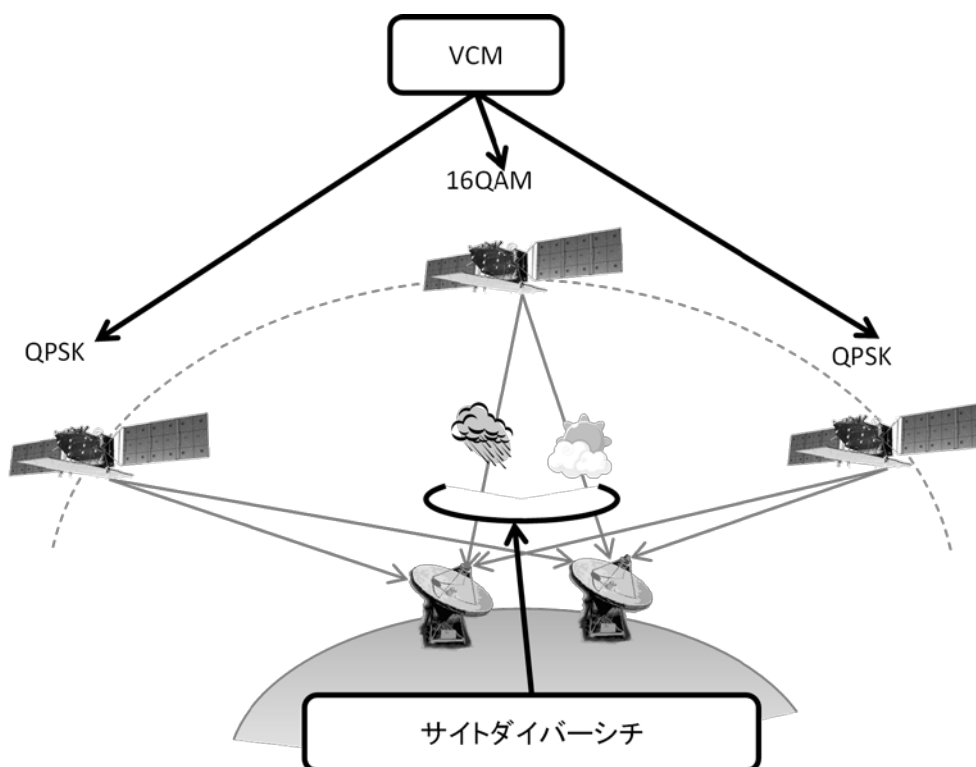


図 2-4 降雨減衰対策技術

サイトダイバーシチ技術[34]は、数十キロ離れた複数の地球局を照射するように低軌道周回衛星のアンテナを指向してデータを伝送する。それぞれの地球局は受信データを復調・復号し、中央局に転送する。中央局は復号後のデータを選択合成または最大比合成することで元のデータを得る。なお、ITU (International Telecommunication Union) は長年の実測定結果に基づき、降雨、雲などを含む電波伝搬をモデル化しており、サイトダイバーシチ利用時における不稼働率特性もモデル化している。本モデルでは、2つの地球局における降雨減衰量が同時に閾値を超過する条件付き結合確率として表されている[35]。また、文献[36]-[39]ではマルチビーム衛星において、特定のビームで降雨減衰量が増大した場合に、他のビームに属するゲートウェイへデータを転送するスマートゲートウェイが提案されている。

表 2-3 に ITU で規定されている観測衛星が利用可能な周波数帯を示す。表から明らかのように、Q 帯が最も多くの帯域幅を利用可能であり、文献[40]では、Q 帯を用いた通信特性を明らかにするため、Alphasat Aldo Paraboni Technology Demonstration Payload #5 (TDP#5) からの信号を用いた実験を行っている。表 2-4 に TDP#5 のシステム諸元を示す [38]。本ミッションでは DVB-S2 を用いた適応変調、送信電力制御、サイトダイバーシチの有効性評価、及びビーコン波の受信による Q/V バンドの長期間伝搬路特性評価を行っている。Q/V 帯における伝搬特性(降雨減衰やシンチレーション)の初期試験結果について、Ka 帯と比較して降雨減衰量が 20dB 以上大きく、また、シンチレーションによる減衰が 4dB 程度小さくなる場合が確認されており、理論値と測定結果が整合することが報告されている[40]。

表 2-3 観測衛星システムに対する周波数割り当て

| Band designator | Lower frequency | Upper frequency | Service |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|
| X band | 8.215 GHz | 8.4 GHz | Primary |
| Ka band | 25.5 GHz | 27 GHz | Primary |
| Q band | 37.5 GHz | 40.5 GHz | Secondary |

表 2-4 TDP#5 のシステム諸元

| No | 項目 | | 値 |
|----|------|----------|------------------------|
| 1 | 周波数 | 上り(通信) | 47.85-48.15GHz |
| 2 | | 下り(通信) | 37.85-38.15GHz |
| 3 | | 上り(ビーコン) | 19.701GHz |
| 4 | | 下り(ビーコン) | 39.402GHz |
| 5 | 偏波 | | 直線偏波 |
| 6 | ビーム数 | | 通信ビーム: 4 ビーコンビーム: 1 |
| 7 | 地上局 | | 送受信局: 2 受信局: 2 |
| 8 | 通信方式 | | DVB-S2 |

なお、表 2-3 に示すように、X 帯、Ka 帯は観測衛星が一次利用であるのに対し、Q 帯は二次利用であり、図 2-5 に示すとおり国内でも同様の扱いとなっている[41]。また、表 2-5 に示すように国内では 39GHz 帯近辺を利用する地上無線システム[42]は既に多く展開されていることから、これら一次利用者への与干渉を考慮する必要がある。具体的には、一次利用者以外からの干渉による稼働率の低下量を最大 1%に抑えることが規定されている[43]。

Q 帯の周波数共用に対し、文献[44]では干渉低減策として以下の手法が推奨されている。

- GEO 衛星と LEO 衛星で逆偏波を用いる。
 - メリット：複雑性が少ない。低コスト。
 - デメリット：偏波多重ができない。
- GEO 衛星と LEO 衛星で地上局を地理的に離し、狭域ビームで分離する。
 - メリット：偏波多重が可能。
 - デメリット：GEO 衛星と LEO 衛星の地球局がお互いに離れている必要がある。
- 複数の LEO 衛星でデータを転送し、GEO 衛星とメインローブが重ならない LEO 衛星から地上局へ送信。
 - メリット：偏波多重が可能。
 - デメリット：2 局以上の衛星が必要となり、コストと複雑性が高くなる。

これら手法は静的な干渉低減策であるのに対し、文献[45]、[46]ではコグニティブ技術を衛星に適用する手法が提案されており、周波数の空き状況に応じてビームフォーミングと動的な周波数割り当てを行うことで周波数利用効率を向上することが示されている。

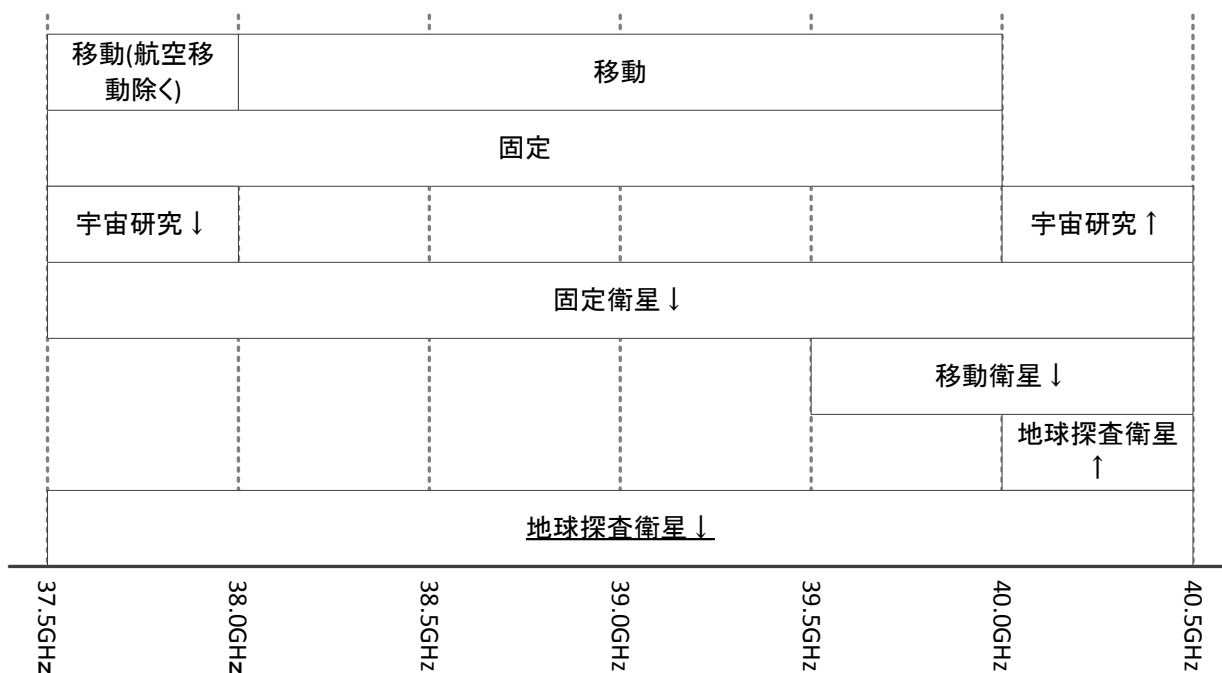


図 2-5 39GHz 帯の国内周波数割り当て

表 2-5 39GHz 帯付近を利用する主なシステム

| No | システム名 | 周波数帯 [GHz] | 全国 | | 関東 | |
|----|----------------------|------------|------|------|------|------|
| | | | 免許人数 | 無線局数 | 免許人数 | 無線局数 |
| 1 | 画像伝送(公共業務用) | | 3 | 155 | 2 | 11 |
| 2 | 公共・一般業務(中継系) | 37.5-37.9 | 29 | 155 | 13 | 81 |
| | | 38.5-38.9 | | | | |
| 3 | 映像 Field Pickup Unit | 41.0-42.0 | 1 | 13 | 1 | 13 |
| 4 | 駅ホーム画像伝送 | | 10 | 10 | 5 | 393 |

Q帯において、観測衛星システムと地上無線システムが周波数を共用する場合、降雨減衰対策と与干渉低減を両立する必要がある。しかし、先行研究では上記を両立する手法については検討されていない。なお、文献[45], [46]に示したコグニティブ衛星はSNRと干渉の双方を考慮した制御を行っているが、静止軌道のマルチビーム衛星を想定しているため、与干渉量の最大値は衛星と地上局間の距離とアンテナパターンから一意的に求めることができる。一方、低軌道周回衛星は、衛星の軌道位置によって地上との距離が変動するため、サイトダイバーシティによる降雨減衰対策や干渉回避は、送受信局の位置関係に応じた制御が必要と

なる。

LEO 衛星は地上局上空を数分で通過することから、ネットワークトポロジの変化を考慮したルーティング技術の検討が複数提案されている。文献[11]では、トポロジが変化する際の通信断を回避するためのチャネル予約方式を提案しており、ルーティング方式は従来から検討されている最小ホップ数基準や最小コスト基準のアルゴリズムが用いられている。また、文献[12]では、LEO 衛星ネットワークを複数のスナップショットとして扱い、トポロジ変化が起きる時間ごとの最小パスを決定している。文献[13]では、衛星軌道が既知であることを利用し、将来にわたるネットワークの接続関係を考慮して最小遅延となるパスを決定する CGR (Contact Graph Routing)法が提案されている。さらには、文献[14]では LEO 衛星の移動に伴い発生するハンドオーバー処理などのコストを数学的に解析している。また、LEO のみならず、MEO (Medium Earth Orbit) [15], [16]や GEO (GEostationary Orbit) [17]と組み合わせた階層型衛星ネットワークの検討も複数提案されており、地理的にトラヒックの偏りが生じた際に、各階層でトラヒックを分散してルーティングすることで QoS (Quality of Service)を維持しつつ輻輳を回避できることが示されている。近年は、複数の狭域ビームで周波数を再利用する HTS (High Throughput Satellite)が実用化されており、データ中継衛星に代わって観測衛星とハイブリッドネットワークを構築することも可能と考えられる。HTS は、各ビームのユーザリンクに数百 MHz の帯域を割り当てることで、システム全体で数十 Gbit/s 以上の通信容量を実現する。また、ビーム数の増加に伴いユーザリンクの総帯域が増大するため、複数のゲートウェイを空間的に離れた位置に設置し、周波数及び偏波を繰り返し利用することでフィードリンクの総帯域を増大する手法がとられている[19]-[24]。

しかし、これら検討では観測衛星ネットワークで特徴づけられるように、衛星と地上局の位置関係に応じて可視時間が変化するという制約は考慮されていない。なお、文献[18]では上記制約を考慮しているものの、評価において地上局は一局のみを対象としており、本検討で想定するように、複数の地上局を考慮したモデルとはなっていない。また、従来の HTS はベントパイプ型の衛星を利用しており、衛星打ち上げ後に各ビームのユーザリンク帯域幅を変更することはできない。また、ユーザリンクとフィードリンクの接続関係も静的に割り当てられている。よって、災害時など特定の地域で観測・通信需要が集中する場合、対象となる地域をカバーするビームには従来の HTS を上回るユーザリンク帯域を割り当てる必要がある。

2.4. システムモデル

図 2-6 に本論文で想定するシステムモデルを示す。本システムは、異なる地方太陽時を有する複数の軌道上に配置される観測衛星と、地上局、制御局から構成され、制御局は、衛星間通信と衛星-地上局間通信を制御する。通信衛星コンスタレーションとは異なり、観測衛星コンスタレーションは全球をカバーしないため、通信時間は地上局の可視範囲に限定される。なお、地上無線システムは地球局と同一地域に一様分布で配置されており、観測衛星は観測したデータを一時的に保持した後、制御局の指示に従い、地球局が視野外の場合は衛星間伝送を行い、地球局が視野内に入ると衛星-地球局間伝送を行う。また、制御局は衛星、地球局、地上無線システムの端末位置を把握しており、これらの位置関係に応じて観測衛星のデータ伝送を制御する。

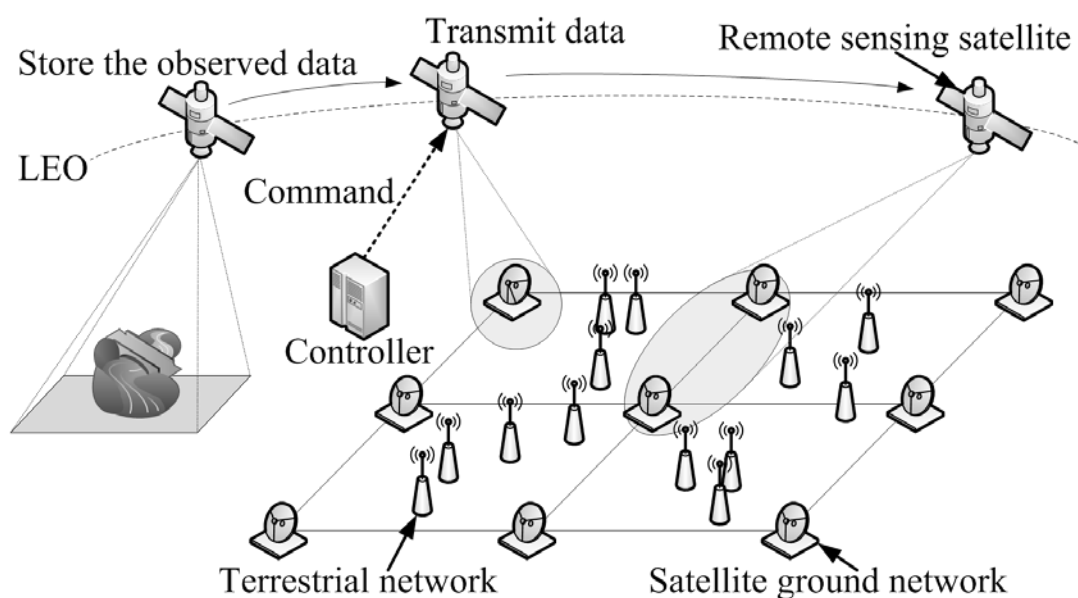


図 2-6 システムモデル

以下に、LEO ネットワークにおける伝送容量と送信遅延について定式化する。通信時間 $T1$ から $T2$ における VCM 適用時の伝送容量, C , は、時刻, t ,における周波数利用効率 (bit/s/Hz), $\alpha(SNR(t))$, SNR (Signal to Noise power Ratio), $SNR(t)$, シンボルレート, $B(t)$, を用いて以下のように表すことができる：

$$C = \int_{T_1}^{T_2} e^{(SNR(t))} B(t) dt \quad (2.1)$$

ここで、周波数利用効率は、 $SNR(\theta)$ において、所望の誤り率を満たす変調方式と符号化率から計算することができ、実際の運用では衛星から送信される基準信号から地球局がSNRを測定し、変調方式と符号化率を衛星にフィードバックするACM方式か、仰角をパラメータとしてSNRを予め推定し、フィードバック無しに変調方式と符号化率を変更するVCMが用いられる。なお、 $SNR(\theta)$ は、衛星間通信と直接伝送回線におけるSNRの総和であるため、衛星間通信のホップ数、 n 、EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power)、 $E_{I(n)}$ 、電波伝搬ロス $L_{I(n,\theta)}$ 、 n ホップ目におけるG/T、 $G_{I(n)}$ 、と、直接伝送回線におけるEIRP、 E_D 、電波伝搬ロス、 $L_{D(\theta)}$ 、G/T、 G_D 、を用いて以下のように表すことができる：

$$SNR(t) = \left[\sum_{n=0}^{N-1} \{E_{I(n)} L_{I(n,t)} G_{I(n)}\}^{-1} + \{E_D L_{D(t)} G_D\}^{-1} \right]^{-1} \quad (2.2)$$

EIRP は、送信出力と送信アンテナ利得の和であり、送信アンテナ利得、 $G_t(\theta)$ 、は最大アンテナ利得 G_{max} 、地球局 R_i (e.g. R_1 or R_2)における半値角 $\theta_i(t)$ 、半値角における送信アンテナ利得、 θ_{3dB} 、を用いて以下のように表すことができる[47]。

$$G_t(t) = G_{max} - 3 \left(\frac{\theta_i(t)}{\theta_{3dB}} \right)^2 \quad [dB] \quad (2.3)$$

ここで、 $\theta_i(t)$ は図 2-7 における R_iSB の成す角度であり、 R_i と S の距離 $d_{R_iS}(t)$ と、 B と S の距離 $d_{BS}(t)$ と、 R_i と B の距離 d_{R_iB} を用いて以下のように表すことができる。

$$\theta_i(t) = \arccos \left(\frac{d_{R,S}(t)^2 + d_{BS}(t)^2 - d_{R_iB}^2}{2d_{R,S}(t)d_{BS}(t)} \right) \quad (2.4)$$

衛星間通信は自由空間であるため、 $L_{I(n,\theta)}$ は送信波長、 λ 、地球中心から衛星までの距離、

d , 軌道面あたりの衛星数, N_s , 衛星緯度, θ_a , 衛星軌道面数, N_p , を用いて以下のように表すことができる:

$$L_{I,n} = \begin{cases} \left\{ 4\pi d \sqrt{2 - 2 \cos\left(\frac{2\pi}{N_s}\right)} \right\}^2 & (\text{same plane}) \\ \left\{ \frac{4\pi d \cos(\theta_a)}{\lambda} \sqrt{2 - 2 \cos\left(\frac{\pi}{N_p}\right)} \right\}^2 & (\text{neighbour plane}) \end{cases} \quad (2.5)$$

一方, 直接伝送回線は距離減衰に加えて大気による減衰[35], $L_{A(\theta)}$, を考慮する必要があるため, $L_{D(\theta)}$ は, 大気による減衰 $L_{A(\theta)}$, 地心を中心として衛星と地上局とのなす角度, ϕ_0 , 仰角, E , を用いて以下のように表すことができる.

$$L_{D(t)} = L_{r(t)} + \left\{ \frac{4\pi d \sin(\phi_0)}{\lambda \cos(E)} \right\}^2 \quad (2.6)$$

伝搬ロスには降雨減衰, 雲による損失, 水蒸気をはじめとする大気吸収損失, シンチレーションによる損失の総和として定義されるが, 高周波数帯では降雨減衰が支配的である. ここで, 伝搬ロスは降雨減衰のみ考慮する場合, 単一局での受信における伝搬ロス $L_{A(\theta)}$ は仰角 $\phi(t)$ と, 不稼働率 p と大気通過距離 L_E と受信局の座標に関連する重み係数 γ_R を用いて以下のように表すことができる[35].

$$L_{r(t)} = \gamma_R L_E(t) \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-(0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(\gamma_R L_E(t)) - p(1-p) \sin \phi(t)} \quad (2.7)$$

つまり, 対象システムの目標不稼働率を規定することで, 考慮すべき降雨減衰量は一意に決定することができる. ここで, サイトダイバーシチ適用時の不稼働率 P_s は, 両方の受信局で同時に降雨となる結合確率 P_r と, 各地球局 R_1, R_2 における降雨減衰量 A_1, A_2 が閾値 a_1, a_2 を超過する結合確率で表すことができる.

$$P_s(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2) = P_r P_a \quad (2.8)$$

式(2.8)より，サイトダイバーシチ適用時の不稼働率は単一局で受信した場合の不稼働率よりも低くすることができる．つまり，目標となる不稼働率に対して，サイトダイバーシチ適用時は単一局で受信する場合と比較して見積もるべき降雨減衰量を少なくすることが可能となる．ただし，サイトダイバーシチ適用時は，2つの地球局を同時にカバーするようにビームを照射する必要があることから，地球局間の受信 SNR は送信アンテナの指向方向に応じて差が生じる．ここで，サイトダイバーシチと VCM の組み合わせを想定した場合，所望の誤り率を満たすためには，変調方式と符号化率は受信する2局のうち SNR が低い方に合わせる必要があるため，ダイバーシチゲインが低下する．

次に，衛星システムと地上システムが周波数共用する場合の条件について示す．同一周波数を共用する場合は，干渉により他システムの通信性能に影響を及ぼすことから，許容干渉電力を定義する必要がある．干渉によるフェードマージン， D ，は干渉対雑音電力比， INR ，を用いて以下のように表すことができる．

$$D = 10 \log(1 + 10^{INR/10}) \quad (2.9)$$

ここで， INR は文献[48]より対象システムのノイズフロアより 10dB 以上下回ることが規定されている．よって，許容される干渉電力 I_{th} はボルツマン定数 k と，地表面温度(290K)と，帯域幅 B と，雑音指数 N_F を用いて以下のように表すことができる．

$$I_{th} = 10 \log(kTB N_F) + INR \quad (2.10)$$

文献[48]より，Q帯のシステムにおける雑音指数を 8dB とすると，許容される干渉電力は 146 dBW/MHz であり，このときのフェードマージンは 0.4dB となる．つまり，観測衛星システムは上記で求めた許容干渉電力を超過しないようにしなければならない．

また，衛星間伝送において，地上局の配置間隔が運用仰角よりも小さい場合，衛星は常に地上局と通信することが可能である．しかし，衛星が式(2.1)で示した伝送容量よりも大きいデータサイズを保持している場合，一つの地上局では全てのデータを送信することができず，次に通信可能な地上局の上空まで移動するまで待ち時間が生じる．結果として，待ち時間， T_w ，は， i 番目と $i+1$ 番目の地上局との離隔， $\phi_{g(i)}$ ，全てのデータを送信するのに必要な地上局数， I ， i 番目の地上局における視野角， $\phi_{v(i)}$ ，衛星の移動角速度， ω ，を用い

て以下のように表すことができる：

$$T_W = \frac{1}{\omega} \sum_{i=0}^I (\phi_{g,i} - \phi_{v,i}) \quad (2.11)$$

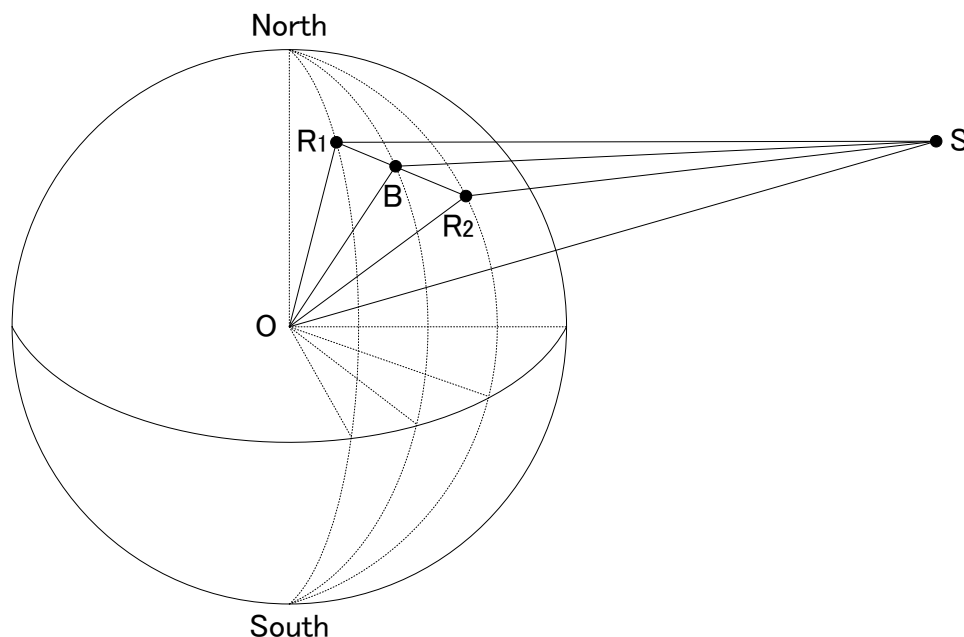


図 2-7 衛星と地球局との位置関係

2.5. 結言

本章では、低軌道周回衛星を利用したシステムの概要と、本研究で取り扱う想定課題を示した。

低軌道周回衛星は、地上システムと比較して広域性を有することと、静止軌道と比較して距離が短く信号の減衰が少ないことから小型端末による通信システムや観測システムに広く利用されている。特に、観測衛星システムは、同一軌道面もしくは異軌道面に複数の衛星を配置するようにコンステレーションを組むことで、観測機会の周期性と網羅性を確保することが可能となるため、今後の動向として衛星数の増加が想定されることを明らかにした。また、技術的観点では、衛星搭載センサの高精細化に伴い、衛星-地球局間伝送は Ka 帯を利用した広帯域化の研究がなされており、降雨減衰対策としてサイトダイバーシチ技術

や適応変調が有効である。また、更なる広帯域化を実現する手段として他システムと周波数共用条件が成立すれば Q 帯の利用が候補として挙げられる。しかし、低軌道周回衛星は、衛星の軌道位置によって地上との距離が変動するため、サイトダイバーシチによる降雨減衰対策や干渉回避は、送受信局の位置関係に応じた制御が必要であることを明らかにした。さらに、観測衛星ネットワークにおける低遅延伝送を考慮した場合、衛星と地上局の位置関係に応じて可視時間が変化するという制約を考慮する必要があることを示した。

上述した課題を本研究で解決することにより、低軌道周回衛星の大容量化手法を確立し、リアルタイム観測衛星システムの実現に貢献する。

第3章 ダイバーシチゲイン最大化と周波数共有を両立するビーム制御方式

3.1. 緒言

近年、多くの観測衛星が世界中で運用されており、光学センサや、合成開口レーダの高機能化に伴い、観測データ量も増大してきているため、観測衛星から地球局への直接データ伝送の速度も増大する必要がある[1]。これまでは X 帯によるデータ伝送が広く用いられ、800Mbit/s の伝送[2]が実現されているが、伝送速度の更なる向上に対しては帯域幅が制約となる。そこで、X 帯(8GHz 帯)と比較して4倍の帯域幅(1.5GHz)を利用可能な Ka 帯(26GHz 帯)を用いた直接データ伝送が検討されている[5]。更には、3GHz を利用可能な Q 帯(39GHz 帯)の利用により更なる伝送速度向上が期待されている[6]。

Ka 帯や Q 帯などの高い周波数帯を用いることで、アンテナ利得と利用可能帯域幅が増加するため、観測衛星から地球局へのデータ伝送速度の向上が可能となる。一方で、降雨など大気による減衰も増加し、特に低仰角は大気通過距離が長いため、影響度が大きい。上記減衰に対し、サイトダイバーシチ技術[7]は高稼働率化の観点で有効であり、実験による有効性が示されている[7]。また、受信 SNR (Signal to Noise power Ratio)に応じて所望の誤り率を満たす変調方式と符号化率を選択する適応変調技術を用いることで周波数利用効率の向上が期待できる[8]。しかし、X 帯から Ka 帯/Q 帯への以降に際して、インフラ設備コストの観点から同一の送受信局を流用した場合、高周波化に伴いアンテナパタンが狭域になるため、受信 SNR は観測衛星と地球局との位置関係に応じて変動するという課題がある。また、Q 帯の利用に際し、観測衛星は二次業務として割り当てられているため、地上無線システムなどの一次利用者への干渉を規定値未満にしなければいけないという課題がある[10]。

上記課題に対し、本章では、観測衛星システムの受信 SNR 改善と、地上無線システムへの与干渉低減について検討を行う。観測衛星システムは複数の地球局と制御局を有し、全仰

角において受信 SNR を最大化すると共に、地上無線システムへの与干渉量を規定値未満に抑えるように適応的に観測衛星の送信ビームを制御する手法を提案する。提案方式は、制御局が観測衛星と地球局と地上無線システムとの位置関係に応じて受信 SNR と与干渉量を推定し、受信 SNR と与干渉量から導出した評価値が最大となるように衛星送信アンテナの指向方向とアンテナ回転角を制御する。なお、本手法は、観測衛星と地上の制御局とのフィードバック情報が不要であり、アンテナ駆動のみで対応可能という利点を有する。また、本提案方式は、地球観測システムの高精細化に寄与するため、文献[49], [50]に示す耐災害ネットワークと連携することで被災地に対して有用な情報を提供することが可能となる。

本章で用いている図表等は以下に示す著者自身の研究成果から一部引用している。

- Shigenori Tani, Katsuyuki Motoyoshi, Hiroyasu Sano, Atsushi Okamura, Hiroki Nishiyama, and Nei Kato, "An Adaptive Beam Control Technique for Diversity Gain Maximization in LEO Satellite to Ground," IEEE International Conference on Communications (ICC 2016), May 2016.
- 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.

3.2. ダイバーシチゲインを最大化するビーム制御方式

3.2.1. 提案手法

衛星から地球局への通信において、衛星送信アンテナの指向方向が二つの地球局の間を指向する場合、アンテナ利得、パスロス、伝播ロスの違いにより、両地球局における受信 SNR はアンバランスになる。特にアンテナ利得の影響は大きく、周波数帯が高いほど影響度が高くなる。図 3-1 に周波数帯とアンテナ利得との関係を示す。従来用いられてきた X 帯と比較して Ka 帯や Q 帯のアンテナ利得はビーム角に対して急峻な特性を示す。例えば、サイトダイバーシチ受信する二つの地球局の間隔, d , が 50km, 衛星高度, h , を 600km と

仮定した場合、天頂(仰角 90 度)でのビーム角, ϕ , は $\text{atan}(\frac{h}{d})$ で表すことができ、約 4.8 度である。この場合、X 帯では最大利得に対して 3.5dB 程度の劣化であるのに対し、Ka 帯と Q 帯は 25dB の劣化となる。よって、図 3-2 に示すように衛星が天頂近傍を通過する場合に、地球局はサイドローブで受信することとなる。一方、低仰角では、衛星と地球局との距離が長くなることからメインローブでの受信が期待できるものの、上述したように SNR のアンバランスは生じるため、適応変調を行う場合に、変調方式と符号化率は所望の誤り率を満たすために受信 SNR が低いほうへフィッティングする必要があり、ダイバーシチゲインが低下するという問題がある。

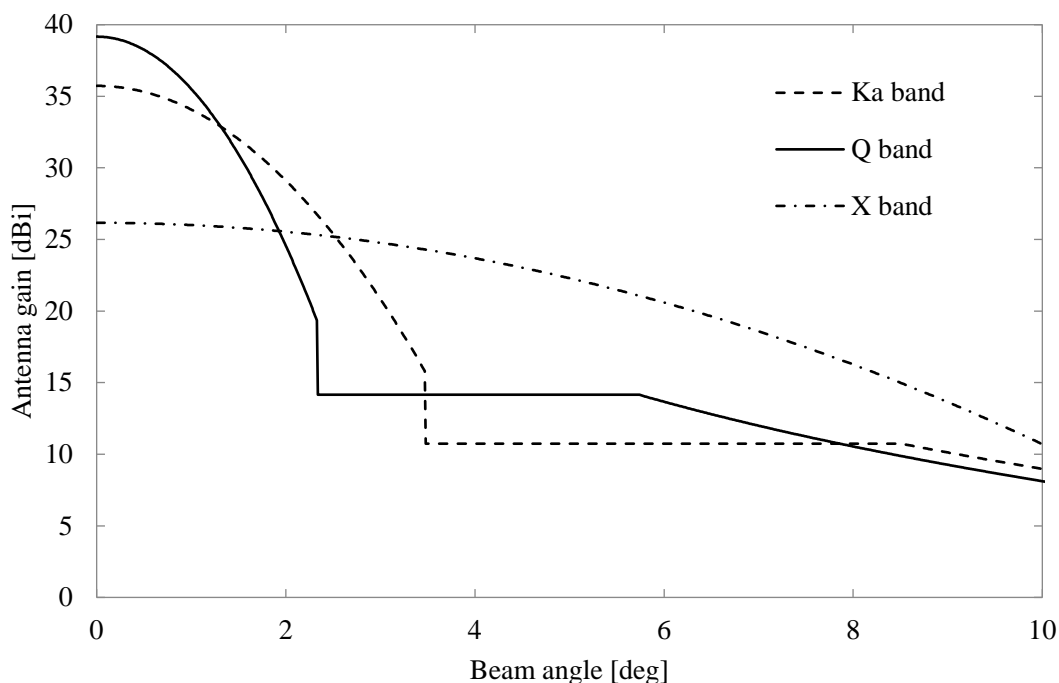


図 3-1 周波数帯とアンテナ利得の関係

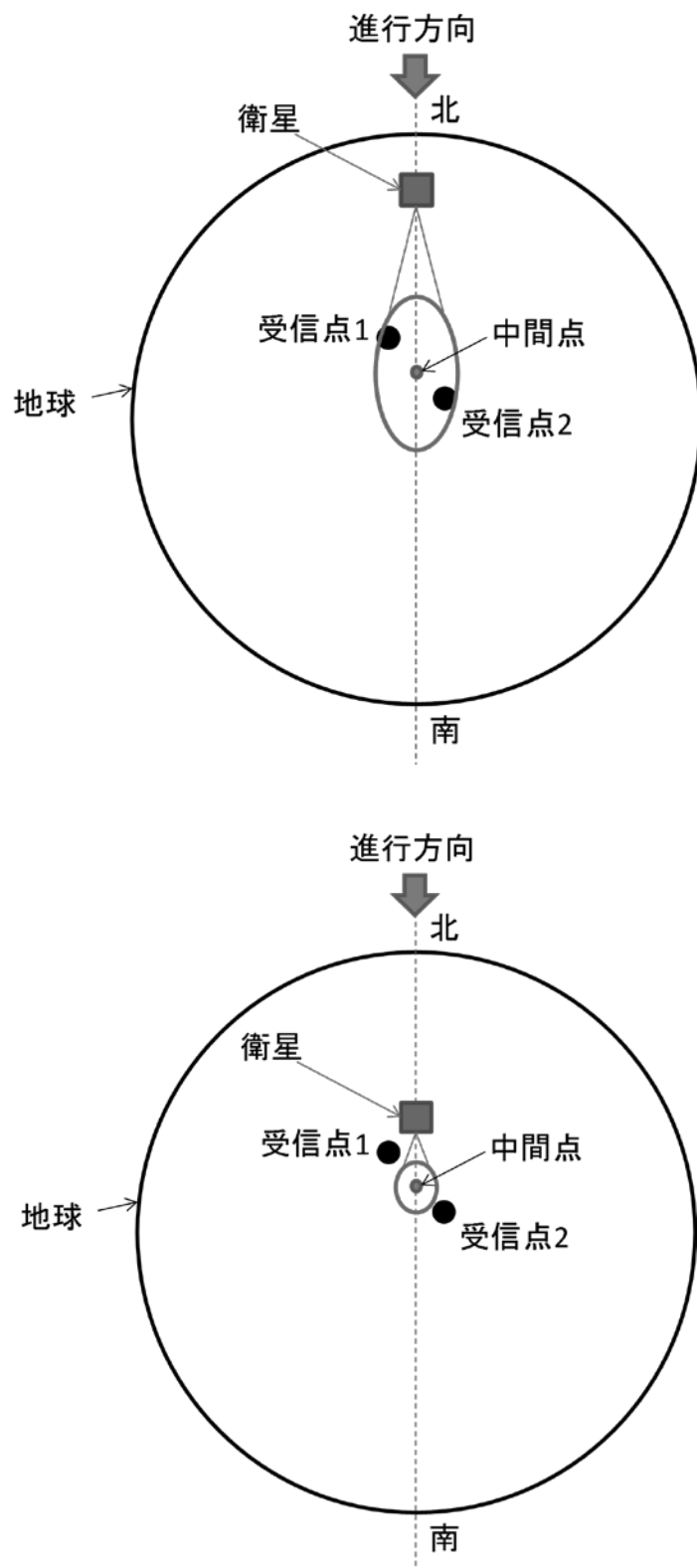


図 3-2 衛星位置とビームパターンとの関係

上記問題に対し、ダイバーシチゲインを最大化する送信ビーム制御法を提案する。提案方式の制御アルゴリズムを Algorithm 1 に示す。はじめに、送信アンテナのボアサイト候補点、 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 、を決定する。左記候補点は二つの地球局を直径とする円内から格子状に選択する。そして、任意の候補点を照射した場合における各地球局の受信 SNR を推定する。ただし、任意の候補点、 c_j において、両地球局が位置するビーム角、 $\theta_j(t)$ 、がメインローブのビーム角、 θ_{th} 、を越えている場合、すなわちサイドローブで受信する場合は候補から除外し、次の候補を選択する。なお、照射候補点、 c_i 、が地球局の位置、 R_i 、と一致する場合は単一受信として降雨減衰を推定し、それ以外の場合はサイトダイバーシチとして降雨減衰を推定する。全候補点に対して式(3.1)に示す受信 SNR、 S 、を推定したら、式(3.2)に示す評価値、 c_{fix} 、が最大となる候補点を解とする。

$$S = \{(SNR_{1,1}, SNR_{1,2}), (SNR_{2,1}, SNR_{2,2}) \dots, (SNR_{n,1}, SNR_{n,2})\} \quad (3.1)$$

$$C_{fix} = \max\{\min(SNR_{j,1}, SNR_{j,2}) \in S : c_j \in C\} \quad (3.2)$$

提案法を適用することにより、サイトダイバーシチ適用時における各地球局の受信 SNR を同レベルにすることが可能となり、ダイバーシチゲインが最大化する。さらには、単一受信とサイトダイバーシチを適応的に選択することで、従来の中間指向と比較して受信 SNR を改善することができる。

Algorithm 1 Beam control algorithm:

```

1:  $j \leftarrow 1$ 
2: while  $j \leq n$  do
3:   if  $\theta_j(t) > \theta_{th}$  then
4:     continue;
5:   if  $c_j = R_i$  then
6:     Calculate SNR as single site transmission.
7:   else
8:     Calculate SNR as site diversity.
9:   end while
10:  $C_{fix} \leftarrow \max\{\min(SNR_{j,1}, SNR_{j,2}) \in S : c_j \in C\}$ 

```

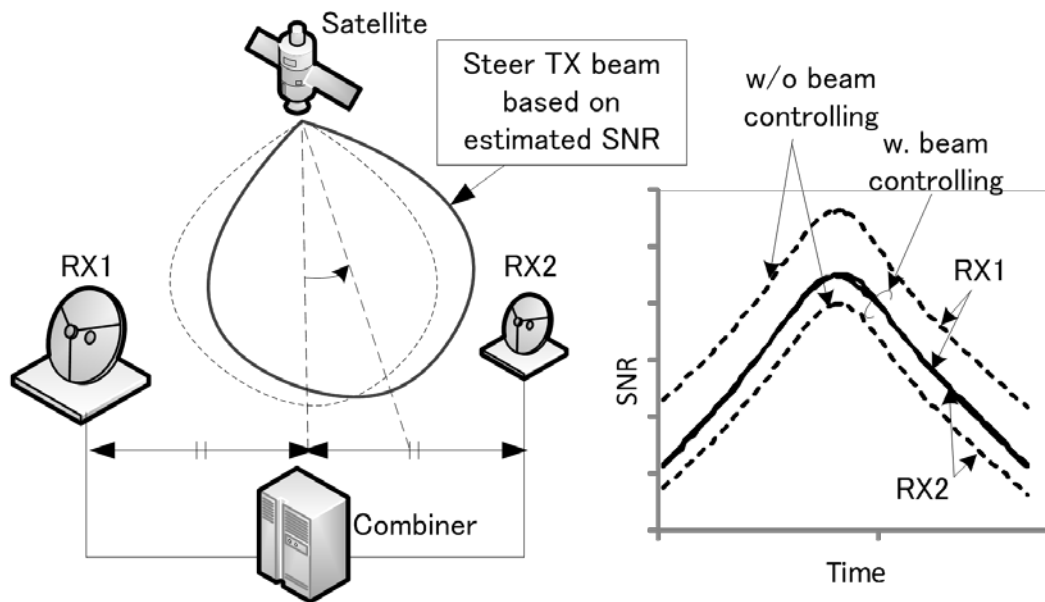


図 3-3 ビーム制御方式の動作例

3.2.2. 評価

提案方式の有効性を示すため、はじめにSNRを推定するための降雨減衰量について示し、その後SNR特性及び周波数利用効率を示す。シミュレーションでは、太陽同期準回帰軌道を想定し、高度600km、回帰日数30日とする。観測衛星はQ帯(39GHz帯)を用い、30cm開口径の円形アンテナを用いる。地球局は、北緯35度、東経134度、及び、北緯35度、東経135度の2地点に配置し、片方の地球局は直径5mのアンテナ、もう一方は5mのアンテナを基準として、受信アンテナ利得を0dBから-6dBまで下げて評価する。SNR推定のための目標不稼働率は0.5%とする。また、衛星送信アンテナの照射候補点は両地球局の位置を直径とする円内から一様に3600点を選択する。

3.2.2.1. 降雨減衰量

図3-4に単局受信とサイトダイバーシチ適用時の不稼働率特性を示す。目標不稼働率を0.5%とした場合、単局受信時の不稼働率は2.1%となる。本特性を用いて、図3-5に単局受信とサイトダイバーシチ適用時における仰角対降雨減衰量特性を示す。図より、仰角5度以上における降雨減衰量は30dB以上低く見積もることができる。

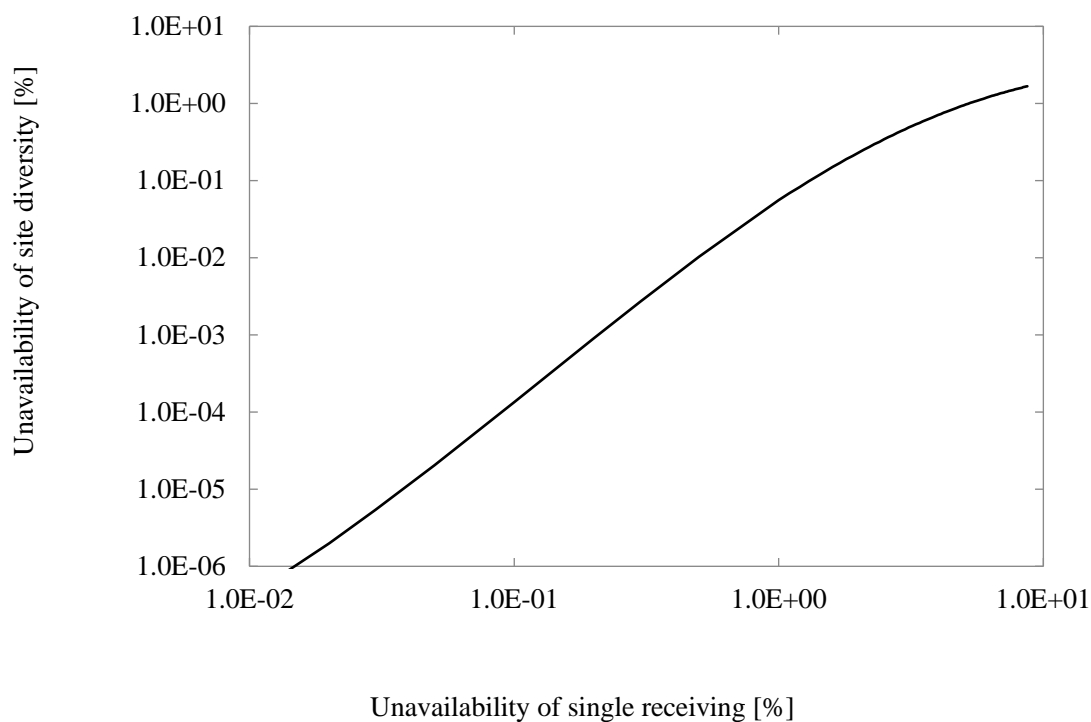


図 3-4 単局受信とサイトダイバーシチ適用時における不稼働率特性

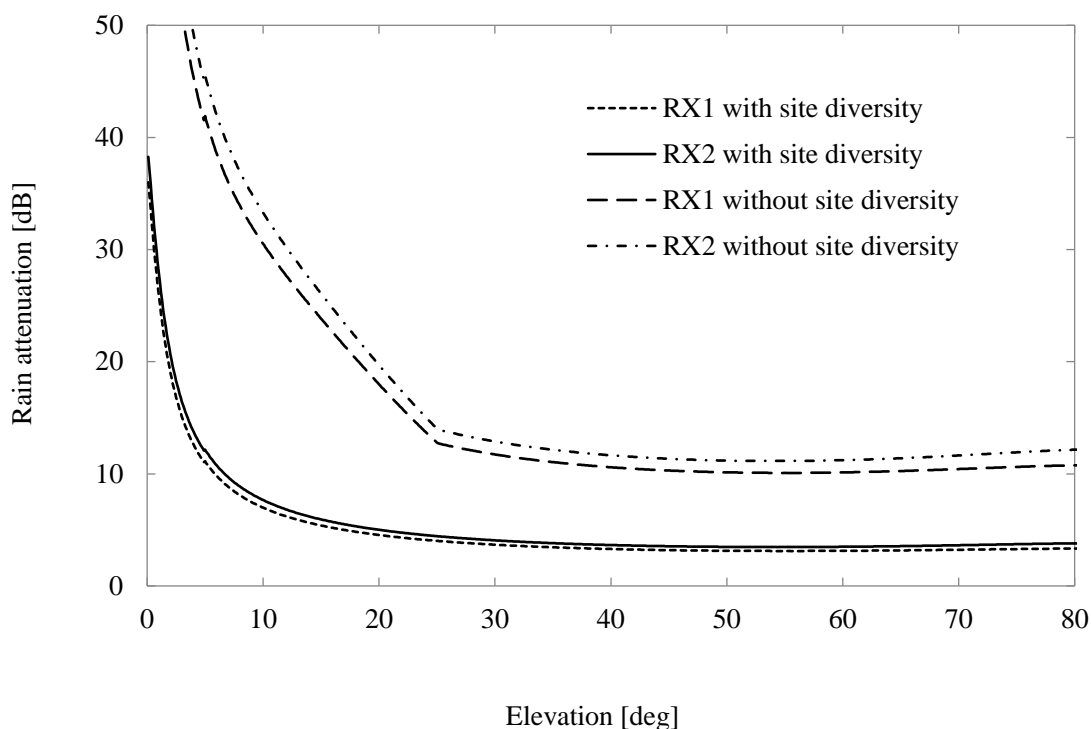


図 3-5 仰角対降雨減衰量特性

3.2.2.2. SNR 特性

図 3-6 から図 3-8 に各ビーム照射方法における仰角対平均 SNR 特性を示す。図 3-6 に示すように、単一局を指向した場合、低仰角において降雨減衰の影響により SNR が低下する。一方、図 3-7 に示すように、2 局の中心を指向した場合、低仰角での SNR は改善するものの高仰角では送信アンテナパタンの端を用いることになり、SNR が低下する。なお、図 3-9 は文献[47]に基づいて送信アンテナパターンを求めたものであり、図からわかるとおり、仰角 30 度未満でのみメインローブで受信できる。提案法は、図 3-8 に示すように単局受信とサイトダイバーシチを仰角に応じて切り替えるようにアンテナの指向方向を制御するため、全仰角において他の方式と比較して SNR を改善することができる。

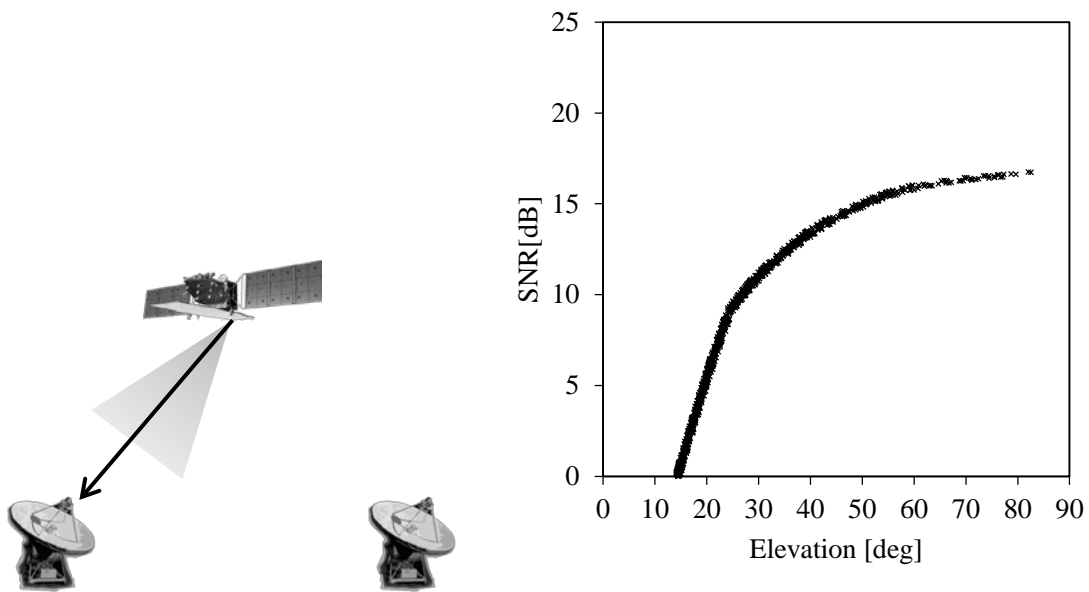


図 3-6 仰角対平均 SNR 特性 (単局指向)

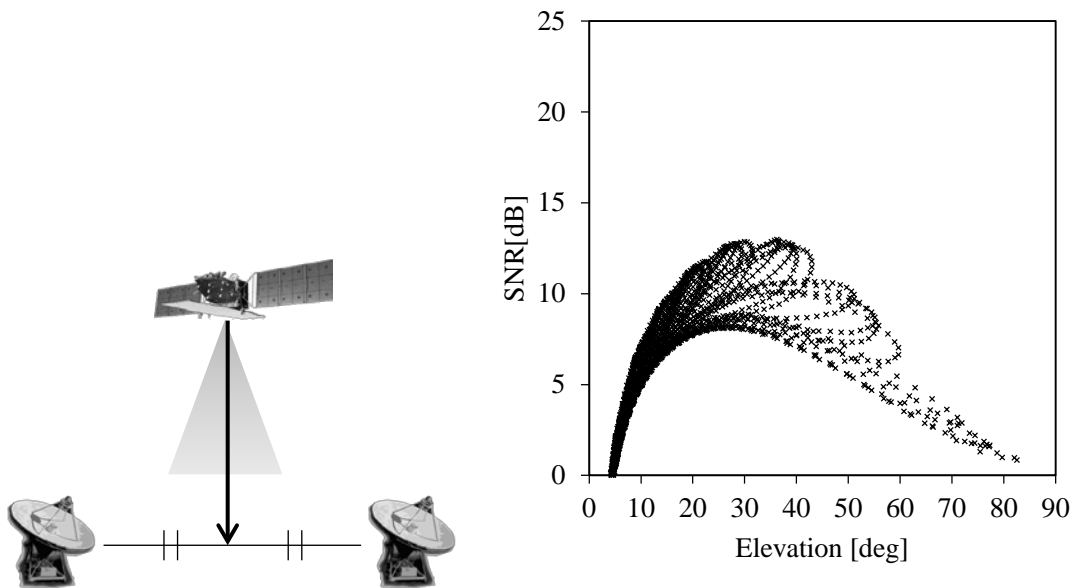


図 3-7 仰角対平均 SNR 特性 (中間指向)

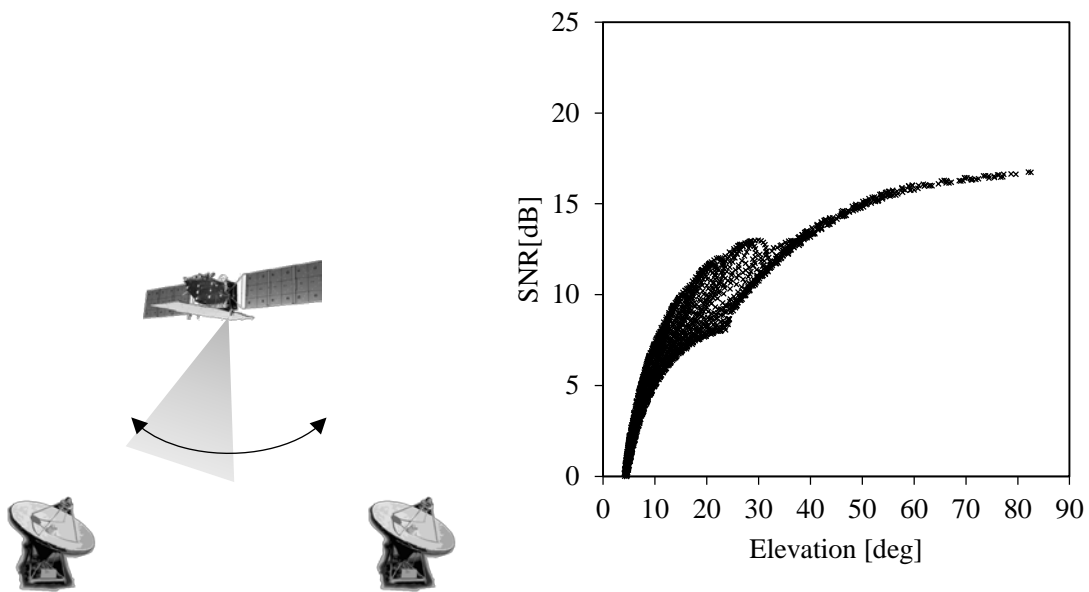


図 3-8 仰角対平均 SNR 特性 (ビーム制御)

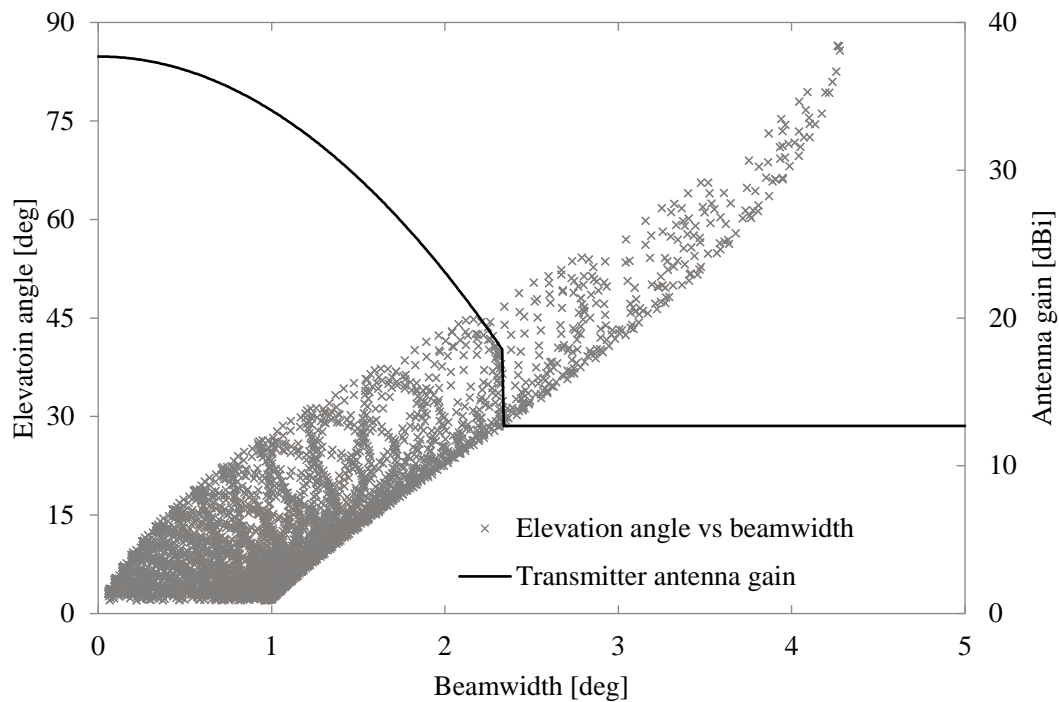


図 3-9 各仰角における送信アンテナビーム幅とアンテナゲインとの関係

図 3-10 及び図 3-11 に地球局の受信アンテナ利得を 0dB から -6dB まで偏差を与えた場合における受信 SNR 特性を示す。ここで、図 3-10 はビーム制御を行わない場合の特性であり、図 3-11 はビーム制御を行った場合の特性である。両特性とも、二つの地球局が同一のアンテナ利得で且つ中間指向した場合の平均受信 SNR で正規化している。図 3-10 より、ビーム制御を行わない場合、受信アンテナ利得に比例して受信 SNR は低下するのに対し、提案法は図 3-11 に示すとおり受信 SNR が改善する。これは、低仰角ではサイトダイバーシチ適用時のビーム照射位置を受信 SNR が最大化するように制御しているのに加え、高仰角ではサイトダイバーシチから単局受信へ適応的に変更しているからである。

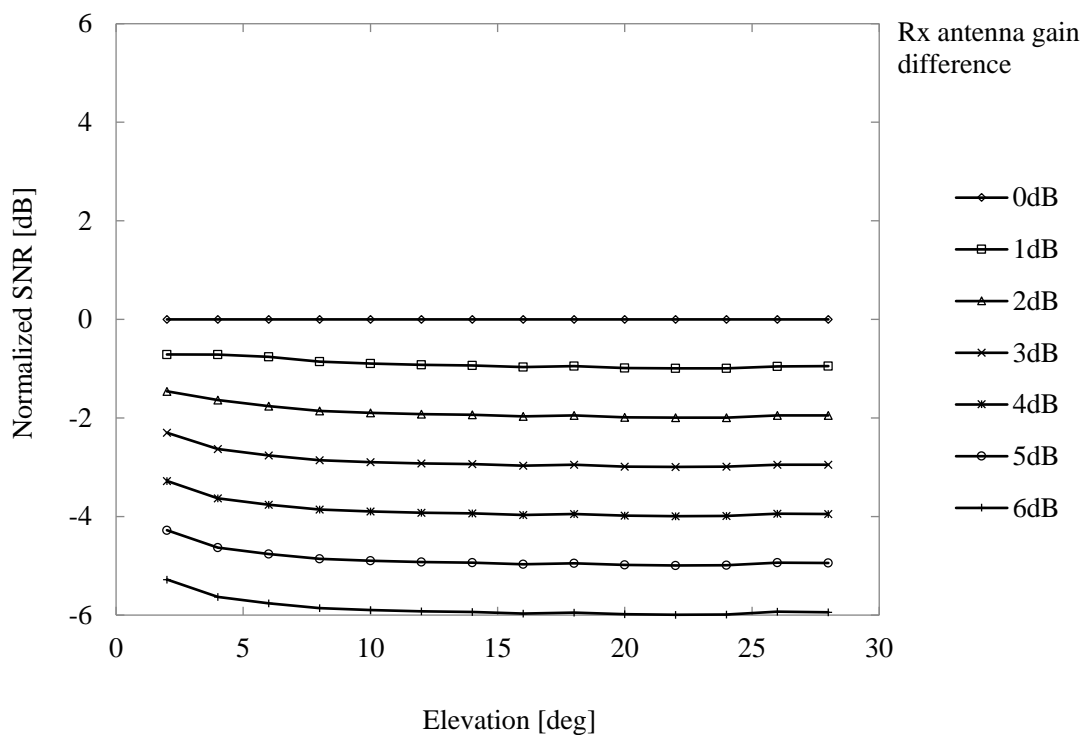


図 3-10 仰角対正規化 SINR 特性(ビーム中心指向の場合)

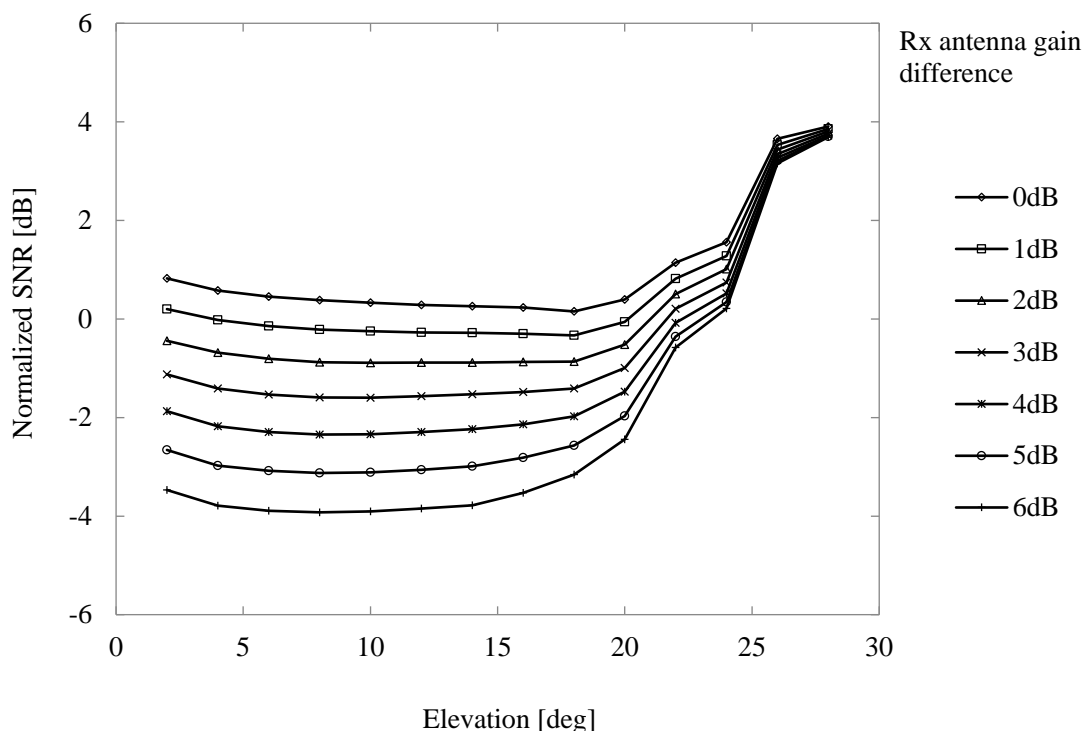


図 3-11 仰角対正規化 SNR 特性(ビーム制御適用時)

3.2.2.3. VCM 適用時の周波数利用効率

図 3-12 に受信 SNR の相補確率密度分布を示す. 図からわかるとおり, 受信 SNR は 10dB から 35dB まで分布していることから, VCM による周波数利用効率の改善が期待できる. ここで, 回線品質の測定誤差や制御遅延がなく, 理想的に VCM が制御できていると仮定すると, 周波数利用効率, E , は以下のように表すことができる.

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} c(i)p(i) \quad (3.3)$$

ここで, i は変調方式と符号化率の組み合わせを示すインデックスであり, $c(i)$ は i 番目の変調方式と符号化率における周波数利用効率 (bit/s/Hz) である. $p(i)$ は受信 SNR が i 番目の要求 SNR 以上且つ $i+1$ 番目の要求 SNR 未満となる確率である.

図 3-13 に周波数利用効率の相補確率密度分布を示す. なお, 変調方式と符号化率の組み合わせは文献[51]を引用している. 図より, 提案法はアンテナ利得の偏差が大きいほど受信

SNR を改善することができており、結果として周波数利用効率は、利得差が 0dB の場合に 5%、利得差が 6dB の場合に 30%改善することができている。

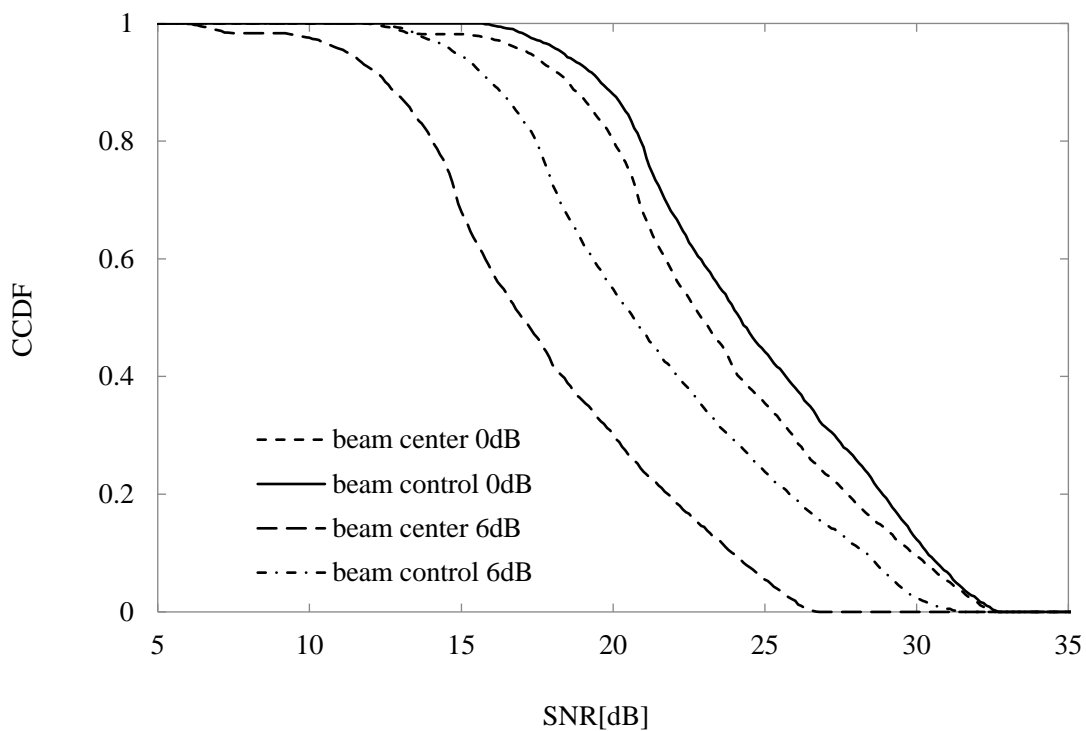


図 3-12 SNR の CCDF.

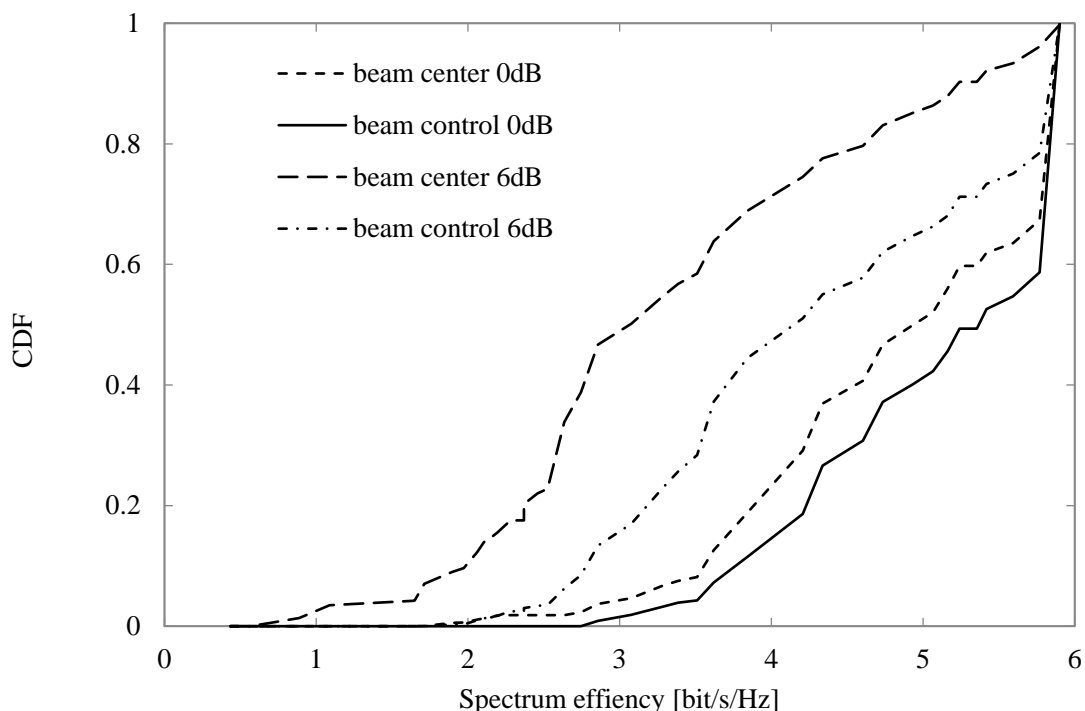


図 3-13 周波数利用効率の CDF.

3.3. システム間周波数共有に関する検討

3.3.1. 提案手法

観測衛星システムと地上無線システムの周波数共有に対し、前節で述べた動的ビーム制御法を改良提案する。本方式の概要を図 3-14 を用いて説明する。(a)に示すように観測衛星が地球局のいずれかを必ず指向する場合、サイトダイバーシチの効果を得ることができない。一方(b)に示すように地球局の中心を常に指向する場合、3章で説明したようにアンテナパターンや軌道位置に応じて受信局間の SNR に差が生じる。更に、高仰角ではアンテナパターンが狭域の場合に地球局がサイドローブに位置するため、SNR が低下する。よって、本提案方式では以下に示す 3 つの手法により上記問題を解決する。はじめに、(c)に示すように観測衛星はサイトダイバーシチと単局受信を動的に切り替えるように送信アンテナの指向方向を変更する。次に(d)に示すように、送信アンテナのパターンを楕円アンテナのように非対称とし、受信 SNR が最大化するようにアンテナの回転角を変更する。最後に、(e)に示す

ように、地上無線システムと地球局が隣接する場合は与干渉を低減するように地球局を選択する。

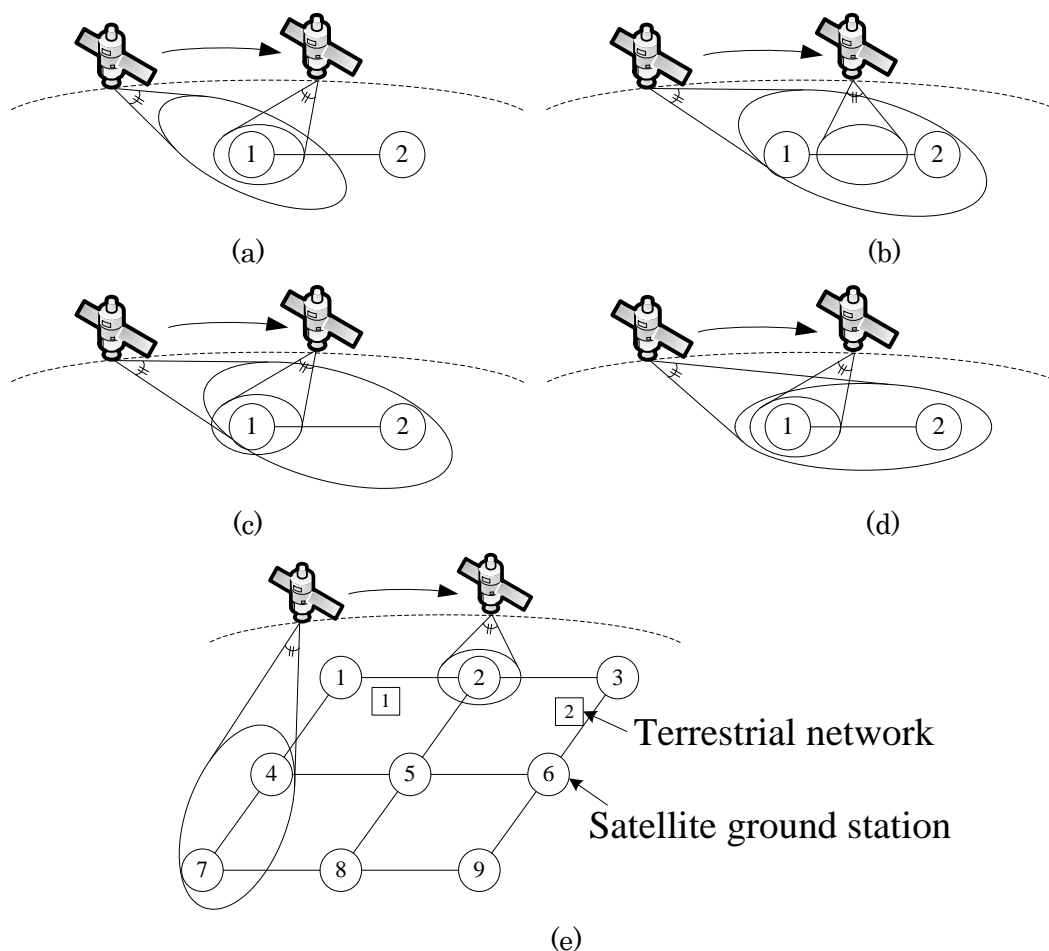


図 3-14 ビーム制御例

本提案方式の制御アルゴリズムを以下に示す。はじめに、 M 個の地球局の中から第一候補 p と第二候補 s を選択する。そして、アンテナの指向方向の候補 c_j を候補グループ $C = \{c_1, c_2, \dots, c_j\}$ から選択する。指向方向のグループは二つの地球局候補の座標を直径とした円の中から選択する。また、アンテナ回転角候補 ϕ_r を選択する、回転角は 0 から 180 度とし、 $\phi_r = \frac{180r}{R}$ である。そして、指向方向の候補 c_j 、回転角候補 ϕ_r に対する受信 SNR, $snr_{p,s,j,r}$ を各地球局に対して推定する。しかし、指向方向 c_j における送信ビーム角、 $\theta_j(t)$ がメインローブ角、 θ_{th} を超過する場合、次の候補を選択する。なお、地球局の第一候補と第二候補が同一地球局である場合、単一受信として降雨減衰を推定し、上記以外の場合はサイ

トダイバーシチとして降雨減衰を推定する。次に、地上無線システム的全端末 F に対する干渉レベル, I_i を推定し, 干渉レベルが閾値, I_{th} , を下回る端末数, $a_{p,s,j,r}$, をカウントする。全候補に対して受信 SNR と干渉レベルを推定したら, 評価値, $h_{p,s,j,r}$, を算出する。ここで, 評価値は SNR, $snr_{p,s,j,r}$ と, 全候補における SNR の最大値, S_{max} , 干渉レベルが閾値を下回る端末数, $a_{p,s,j,r}$, と, 全候補における $a_{p,s,j,r}$ の最大値, a_{max} , と, 重み係数, α , を用いて以下のように表す。

$$h_{p,s,j,r} = \alpha 10^{(snr_{p,s,j,r} - S_{max})/10} + \frac{(1 - \alpha) a_{p,s,j,r}}{a_{max}} \quad (3.4)$$

最後に, 評価値が最大となるアンテナ指向方向 c_j と回転角 ϕ_r を解とする。

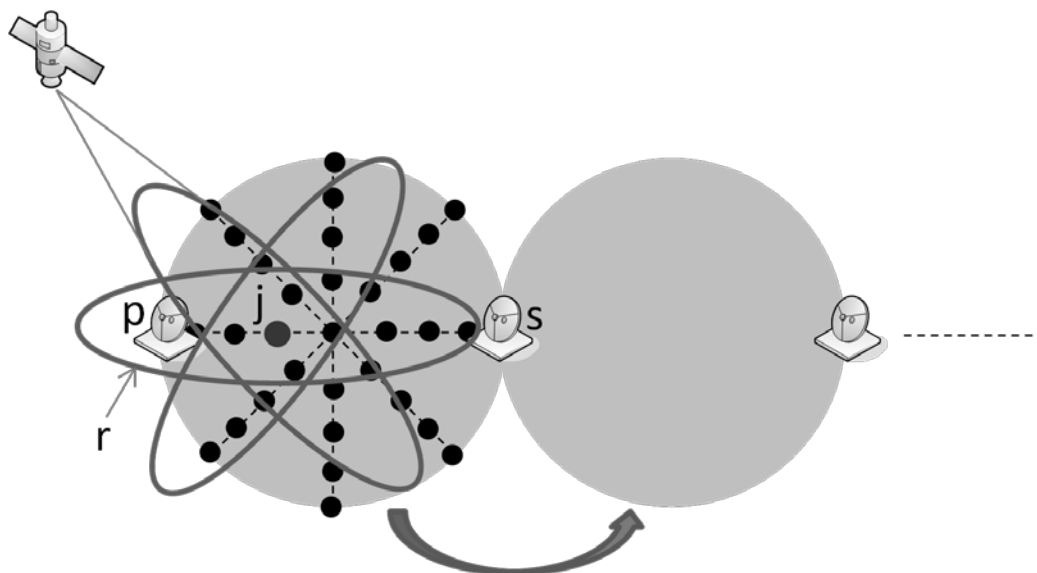


図 3-15 ビーム制御法の動作概要

Algorithm 1 **Beam control algorithm:**

```

1: for  $p \in M$  do
2:      $s \leftarrow p$ 
3:     for  $s \in M$  do
4:         for  $j \in J$  do
5:             Set antenna boresight to  $c_j$ .
6:             for  $r \in R$  do
7:                 Rotate antenna by  $\phi_r$  degrees
8:                 if  $\theta_j(t) > \theta_{th}$  then
9:                     continue
10:                if  $s = p$  then
11:                    Estimate SNR,  $snr_{p,s,j,r}$ , as single site transmission.
12:                else
13:                    Estimate SNR,  $snr_{p,s,j,r}$ , as site diversity.
14:                if  $snr_{p,s,j,r} > S_{max}$  then
15:                     $S_{max} \leftarrow snr_{p,s,j,r}$ .
16:                for  $f \in F$  do
17:                    Estimate received interference,  $I_f$ .
18:                    if  $I_f < I_{th}$  then
19:                        Count up  $a_{p,s,j,r}$ .
20:                    if  $a_{max} < a_{p,s,j,r}$  then
21:                         $a_{max} \leftarrow a_{p,s,j,r}$ 
22:                    end for
23:                end for
24:            end for
25:        end for
26:    end for
27: return antenna boresight,  $c_j$ , and rotation angle,  $\phi_r$ , which maximizes priority
    indicator,  $h_{p,s,j,r}$ .

```

3.3.2. 評価

周波数共有時における提案方式の有効性を示すため、SNR 特性と地上無線システムの稼働率(availability)を評価する。表 3-1 に評価条件を示す。シミュレーションでは、太陽同期準回帰軌道を想定し、高度 600km、回帰日数 30 日とする。観測衛星は Q 帯(39GHz 帯)を用い、30cm 開口径の円形アンテナと、離心率 0.5、等価開口径 30cm の楕円アンテナを用いる。地球局は 9 局を北緯 36 度、東経 137 度から北緯 35 度、東経 138 度まで 0.5 度刻みで格子状に配置する。地球局は直径 5m のアンテナを想定し、SNR 推定のための目標不稼働率は 0.5%とする。地上無線システムの端末数は 10 から 100 局とし、稼働率とは、全端末に対して干渉電力が閾値未満となる端末数の割合と定義する。目標稼働率は 99%以上とし、重み係数 α は 0.0 から 1.0 までとする。

表 3-1 評価条件

| No | 項目 | | 値 |
|----|-----------|--------|---------------------|
| 1 | 衛星軌道 | | 太陽同期準回帰軌道 |
| 2 | 衛星高度 | | 600km |
| 3 | 周波数 | | 39GHz 帯 |
| 4 | 地球局 | | 9 局 (緯度経度 0.5 度離れ) |
| 5 | 衛星送信アンテナ径 | | 30cm |
| 6 | 伝搬モデル | 距離減衰 | 自由空間伝搬損失 |
| 7 | | 降雨減衰 | ITU-R P.618 準拠 |
| 8 | | 大気吸収損失 | ITU-R P.676 準拠 |
| 10 | 地上システム | | 10~100 局 |
| 11 | 許容 INR | | -10dB (-146dBW/MHz) |



図 3-16 評価モデル

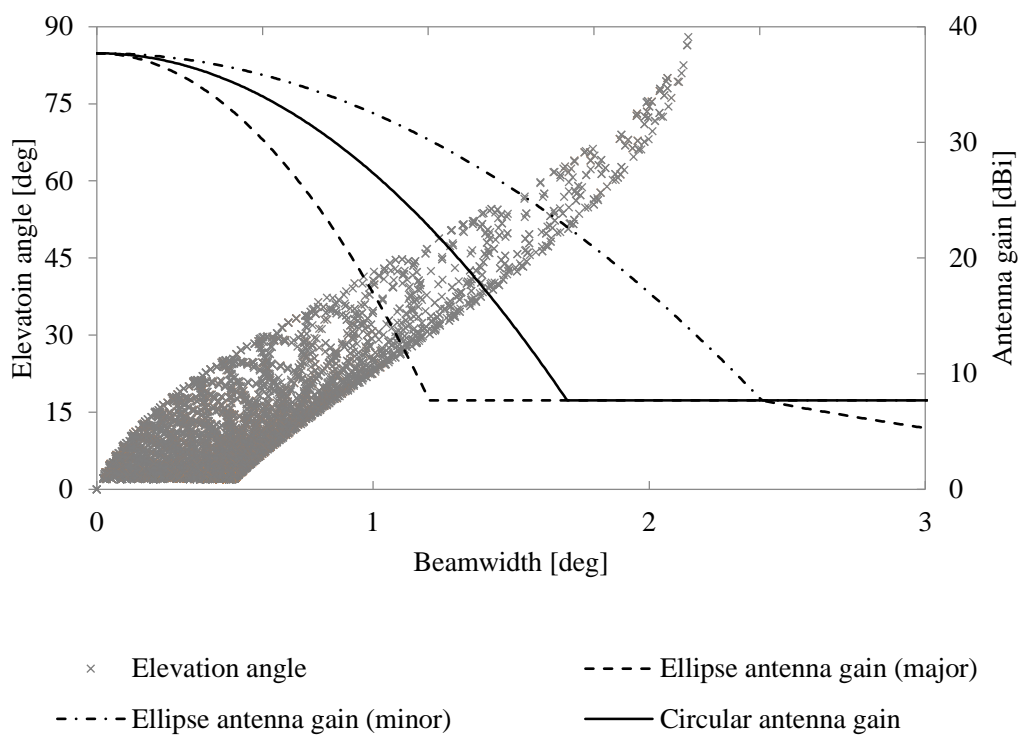


図 3-17 仰角対アンテナ利得

図 3-18 に稼働率特性を示す。また、図 3-19 に SNR 特性を示す。重み係数 α を 0 とした場合、ほぼ 100% の稼働率を実現できるが、SNR は重み係数 α を 1 とした場合と比較して 9dB 程度低下する。一方、重み係数を 1 とすると SNR は改善するものの、稼働率が低下する。図より、重み係数を 0.1 とすること稼働率 99% 以上を満たしつつ SNR の低下を 2dB 程度に抑えることができる。

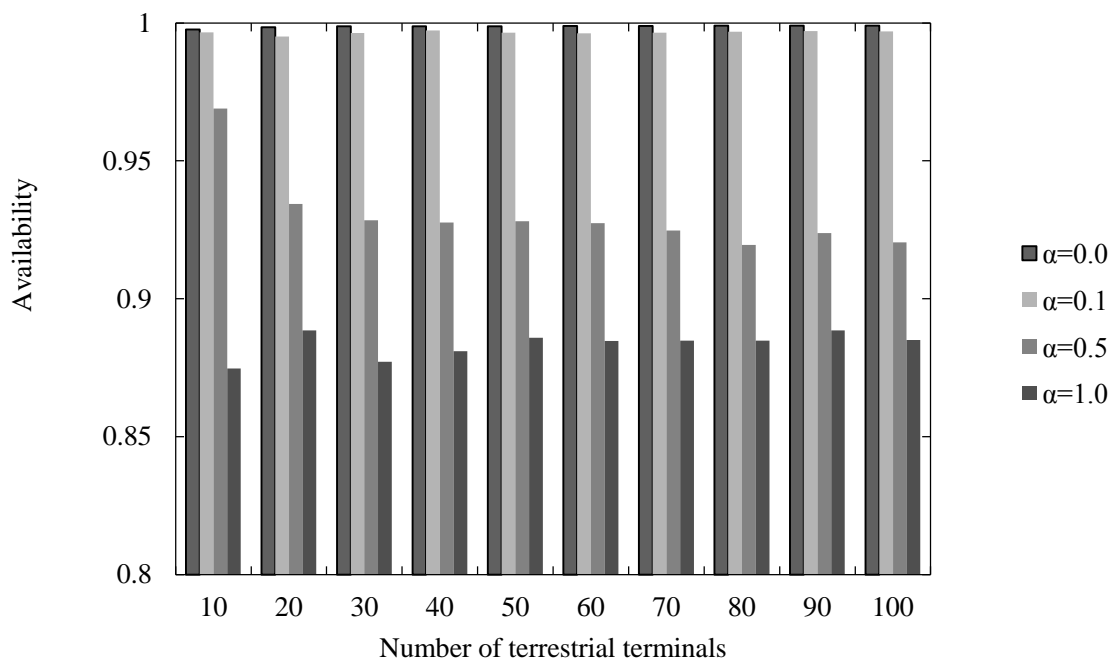


図 3-18 稼働率特性

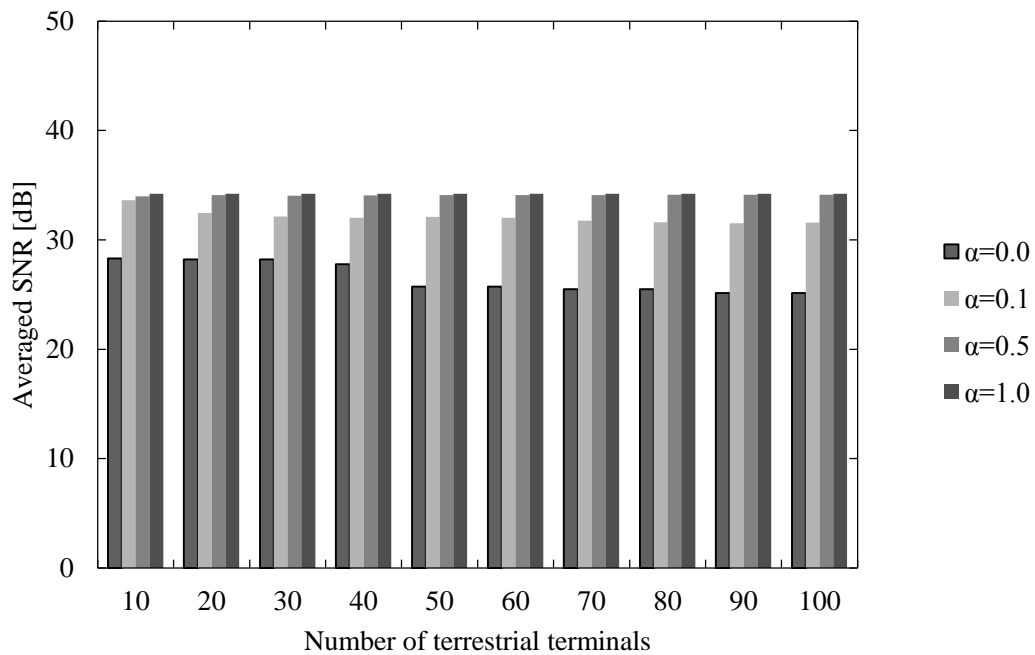


図 3-19 受信 SNR 特性

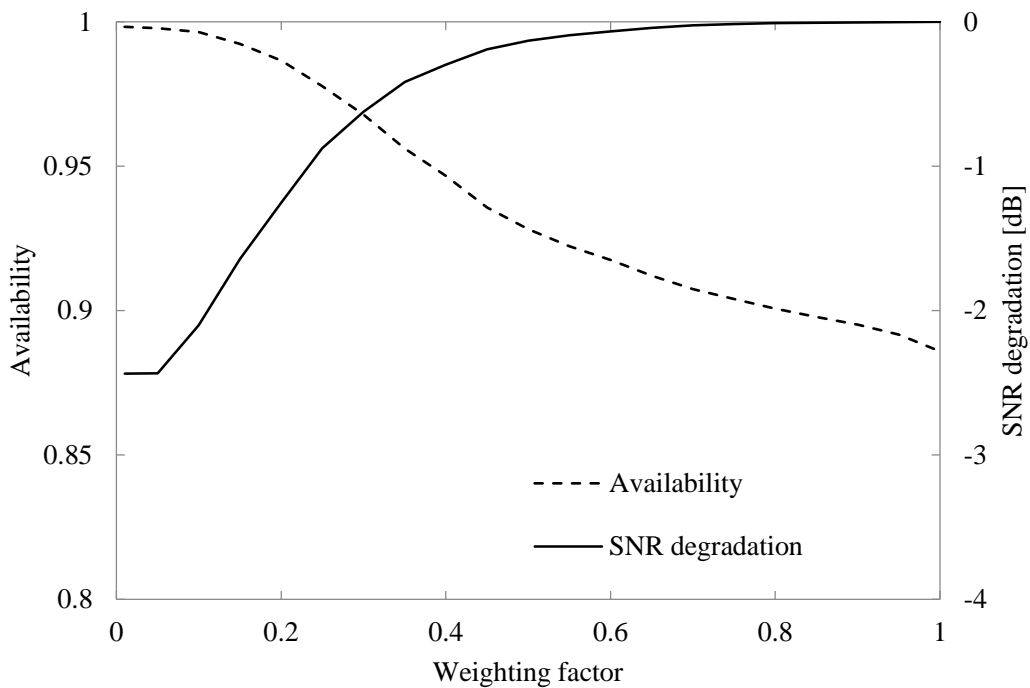


図 3-20 稼働率及び SNR 低下量

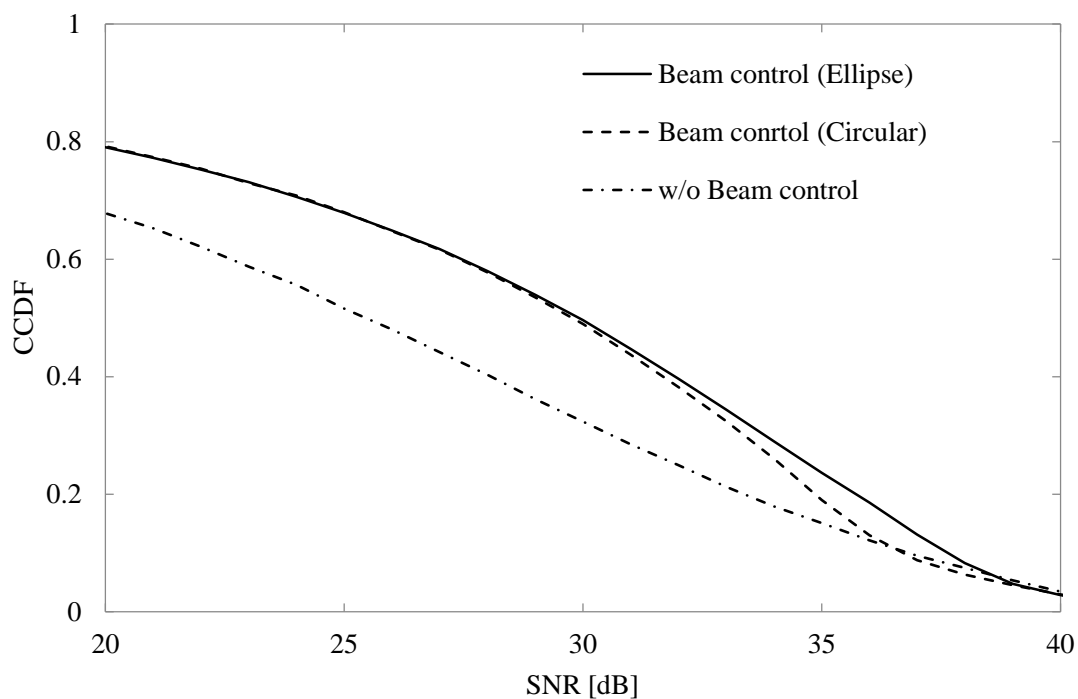


図 3-21 SNR の CCDF

3.4. 結言

本章では Q 帯における観測衛星システムと地上無線システムの通信品質向上について検討を行った。観測衛星システムは複数の地球局と制御局を有し、全仰角において受信 SNR を最大化すると共に、地上無線システムへの与干渉量を規定値未満に抑えるように適応的に観測衛星の送信ビームを制御する手法を提案し、地上システムの稼働率 99%以上を満たしつつ SNR の低下を 2dB 程度に抑えられることを示した。

第4章 低遅延データ伝送を実現する衛星間中継伝送

4.1. 緒言

地球規模の気候変動が進む背景の下、観測衛星を用いた広域観測システムは環境アセスメントや自然災害に対する早期状況把握の観点で有効である。近年は、観測衛星に光学や合成開口レーダによる高精度なセンサを備え、また大量の観測データを蓄積する大容量記憶域を搭載する傾向にある。さらに、低軌道を周回する複数の観測衛星から構成される観測衛星コンスタレーションが、準リアルタイムモニタリングの実現に向けて期待されている。このようなシステムは、高速な画像処理に加え、観測データを迅速に地上局へ伝送する高速データリンクが要求される。

観測衛星のデータリンクは、データ中継衛星を経由する手段と、観測衛星から地上局へ直接伝送する手段がある。ここで、観測衛星は静止軌道に配置されることから、少なくとも3機以上のデータ中継衛星があれば、観測衛星は地球上のいかなる場所においても地上局と通信を確立することができる。しかし、データ中継衛星は観測衛星を追尾するための大口径アンテナが必要となり、同時接続数は1乃至2局に限定される。そこで、従来の無線通信に加え、小型化と高速化が可能な光空間通信を衛星間通信に適用することも検討されており、宇宙空間での実証が進められている[53]。一方、直接伝送回線は静止軌道と比較して距離減衰が小さいことから高速伝送が可能である。しかし、地上局との通信可能時間は、衛星と地上局との可視範囲に限定される。さらに、衛星と地上局との位置関係(すなわち仰角)に依存して回線品質が変動することから伝送容量は送信機会ごとに変化する。よって、観測衛星は送信可能データサイズ以上のデータを蓄積している場合に、全てのデータを伝送できない可能性がある。

低軌道衛星ネットワークの研究はイリジウム等の通信衛星を対象として多くなされている。しかし、通信衛星は地球全域をほぼカバーするのに対し、先行研究は観測衛星のように

可視時間が限定された条件は考慮されていない。また、観測衛星は一度に数百 Gbit の観測データを生成することから、先行研究で広く用いられる Store-and-forward 型プロトコルのようにキュー内滞留遅延が増大する方式を用いずに中継することが望ましい。

上述した課題に対し、本章では、観測衛星コンスタレーションにおいて、送信機会あたりのデータ伝送確率を向上するマルチキャリア・マルチホップ伝送方式を提案する。提案法では、観測衛星がデータを生成すると制御局が直接伝送回線で通信可能な各衛星における期待伝送量を推定する。そして、全ての観測データを送信するために必要な複数の地上局を選定するとともに、当該地上局までの衛星間経路を選定する。なお、経路選択の観点で、従来は、各衛星が隣接する 4 衛星と衛星間通信することを想定しているのに対し、提案法では搭載性の観点から 2 衛星との衛星間通信に限定して検討する。この場合、同時観測衛星数が増大しても、各衛星の経路がお互いに直交しないように経路選択することで高いデータ伝送確率を実現する。

また、観測衛星データリンクは、広帯域化に伴い送信電力も増加することから、高速伝送のためには高出力化が必要となる[54]。特に、直接伝送回線では大気通過距離が長くなる低仰角での通信や、観測衛星とデータ中継衛星間の通信が回線設計上のボトルネックとなる。

上記問題に対し、本章では、観測衛星データリンクの高速化を目的に、マルチキャリア伝送とシングルキャリア伝送を柔軟に切り替えるマルチキャリア・マルチモード変調器を提案すると共に、試作器評価により有効性を検証する。本章で提案する変調器は、2 系統の変調部と 2 系統の送信アナログ系(アップコンバータ、増幅器)を有し、回線品質に応じて 2 系統で異なる信号を変調し、周波数多重で送信するモードと、2 系統で同一信号を変調し、同一周波数で電力合成して送信するモードを実現する。なお、電力合成時には、アナログ系の位相変動によりベクトル合成損が生じることから、増幅後の信号をフィードバックして送信位相を制御する。

さらには、災害時等、特定の地域で通信・観測需要が増大した場合の対策として低軌道周回衛星と静止軌道衛星を統合したハイブリッドネットワークが検討されているが、従来の HTS はビームあたりの周波数帯域幅が固定であり、且つユーザリンクとフィーダリンクの接続関係も静的に割り当てられているため、需要変化に追従できない。よって、本章では、観測・通信需要の集中に対し、ユーザリンクとフィーダリンクが連続した帯域に割り当てられているという Ka 帯の特徴を活用し、通信需要に応じて各ビームのユーザリンクとフィーダリンクの割り当て比率を制御する手法を提案する。

本章で用いている図表等は以下に示す著者自身の研究成果から一部引用している。

- 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 Disaster," IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing (TETC). DOI : 10.1109/TETC.2017.2688078.
- Shigenori Tani, Michiya Hayama, Shogo Tsuzaki, Katsuyuki Motoyoshi, and Atsushi Okamura, "Multi-carrier and Multi-mode Transmitter for Earth Observation Satellite," AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2017), Oct. 2017. (Accepted)
- Shigenori Tani, Michiya Hayama, Katsuyuki Motoyoshi, Atsushi Okamura, Hiroki Nishiyama and Nei Kato, "Multi-carrier Relaying for Successive Data Transfer in Earth Observation Satellite Constellations," IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2017), Dec. 2017. (Accepted)

4.2. マルチキャリア・マルチホップ方式による低遅延データ伝送

観測衛星コンスタレーションを用いたリアルタイムモニタリングシステムを実現するため、本章では、図 4-1 に示すように観測データを複数に分割し、一つ以上の地上局へマルチホップ伝送する「マルチキャリア・マルチホップ方式」を提案する。図 4-2 に提案法における衛星構成を示す。従来の観測衛星と比較して、提案法では、一つ以上の送信機とチャネライザ[52]を追加する。送信機は式(1)に示す伝送容量に従い、適切なシンボルレート、及び MODCOD で符号化変調する。チャネライザは、送信機から入力される信号をサブチャンネルに分波し、スイッチで所望の送信先に方路を切り替えた後に、自身の信号と他の衛星からの信号を、衛星間リンクまたは直接伝送回線へ送信するように合波する。図 4-3 に、提案法における送信例を示す。観測衛星はデータを生成すると、制御局は地上局と通信可能な衛星それぞれについて、送信可能容量を算出する。その後、全てのデータを送信するための複数の地上局を選択するとともに、当該地上局へ伝送するための衛星間通信のルートを決定する。結果として、提案法は一つの地上局のみへデータを伝送する従来

法と比較して伝送待ち時間を低減することができる。

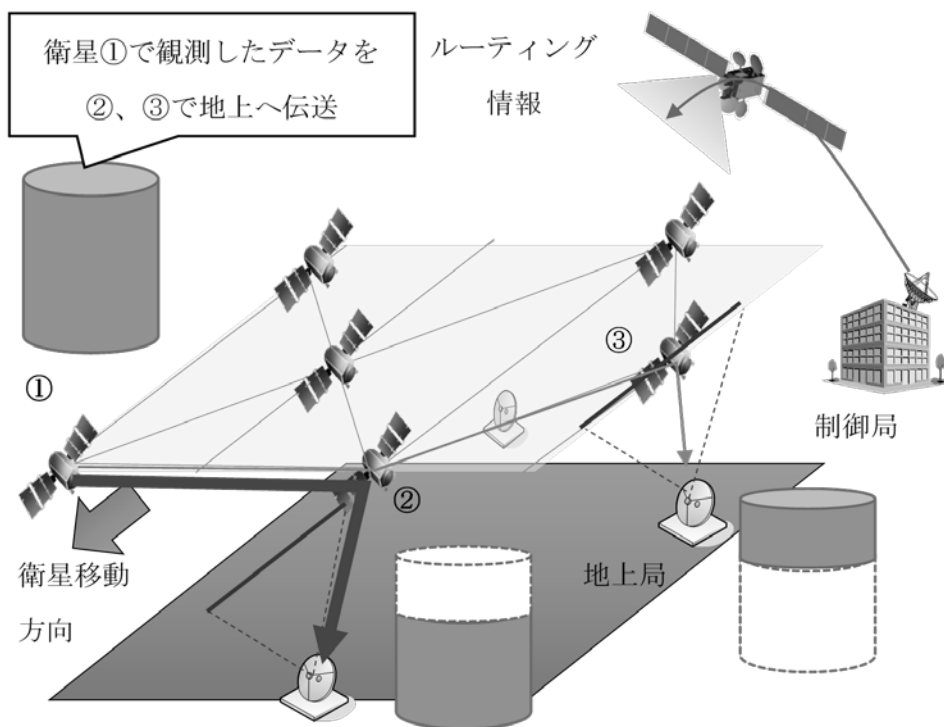


図 4-1 提案方式の動作概要

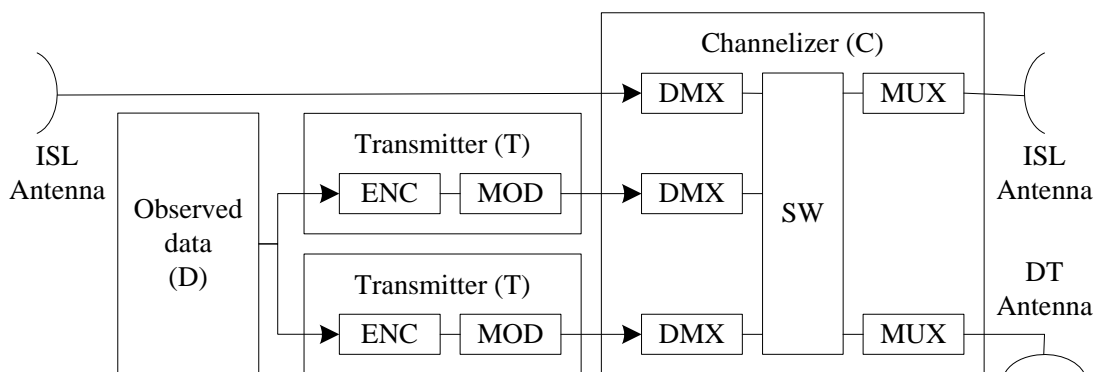


図 4-2 衛星構成

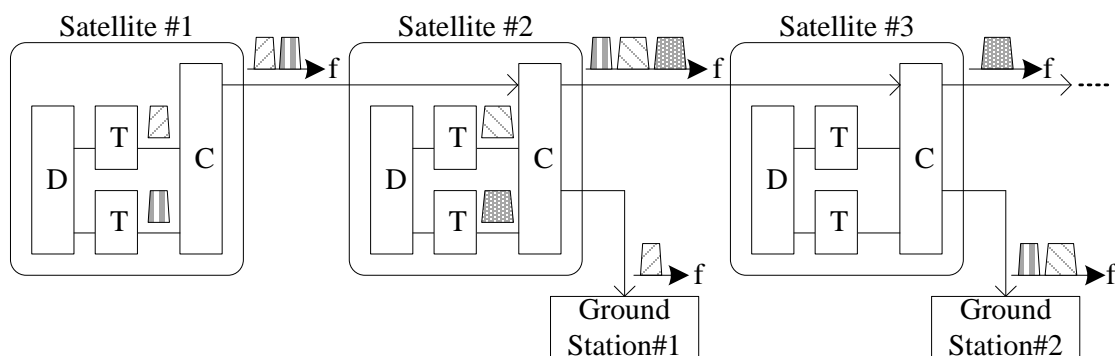


図 4-3 データ伝送例

提案法におけるルーティングアルゴリズムを Algorithm 1 に示す．初期化処理において，グラフ， G_s ，に含まれる全ての衛星に対して，隣接する 4 つの衛星と接続する候補辺を付加する．また，観測データを保持する衛星， $S_{tx} \in G_s$ ，はデータサイズが昇順になるようソートする．繰り返し処理では，最小データサイズ， $d_{tx(s)}$ を有する衛星， $s \in S_{tx}$ ，を始点ノード， n_s ，に設定し，また，地上局と通信可能な衛星， S_{rx} のうち，始点ノード， n_s ，からの距離がもっとも短い衛星， $r \in S_{rx}$ ，を終点ノード， n_d ，に設定する．そして，最小パスルーティングアルゴリズムを用いて， n_s から n_r に対する i 番目の部分経路， $p_{(s,i)}$ ，を決定する．これにより，衛星 S_{tx} が増加した場合においても他の衛星のルートが極力阻害されないようにすることができる．部分経路， $p_{(s,i)}$ ，における送信データサイズの推定値， $d_{est(s,i)}$ ，を計算した後，もし，部分経路全てにおける推定データサイズの和， $\sum_{k=0}^i d_{est(s,k)}$ ，が滞留データサイズ $d_{tx(s)}$ より小さいか，部分経路の数， $c_{(s)}$ ，が送信機数， c_x ，よりも小さい場合， n_s を n_d に更新し，残りのデータを送信するために次の地上局を選択する．また，提案法では衛星間リンクは最大 2 本を想定しているため，割り当て済みの経路に含まれるノードのうち，未使用の辺を削除する．一方，部分経路全てにおける推定データサイズの和が滞留データサイズ $d_{tx(s)}$ より大きい場合，部分経路， $p_{(s,0)}$ ，から $p_{(s,i)}$ を結合し，当該衛星 s に対する経路として決定する．これにより，提案法は送信機会ですべての観測データを送信することが可能となる．

Algorithm 1 Routing algorithm:

```

1: Add candidate edges for neighboring satellites.
2: Sort satellites,  $S_{tx} \in G_s$ , in the order of data sizes.
3:  $s \leftarrow \{x \in S_{tx} : \min(d_{tx(x)})\}$ 
4: for  $s \in S_{tx}$  do
5:   Set  $s$  to a source node,  $n_s$ .
6:   Sort satellites,  $S_{rx}$ , in the order of path length from  $n_s$ .
7:    $r \leftarrow \{x \in S_{rx} : \min(l_{(x)})\}, i \leftarrow 0$ 
8:   for  $r \in S_{rx}$  do
9:     Set  $r$  to a destination node,  $n_d$ .
10:    Decide a path,  $p_{(s,d)}$ , from  $n_s$  to  $n_d$ .
11:    Calculate estimated transmission data size,  $d_{est(s,d)}$ .
12:    if  $d_{tx(s)} < \sum_{k=0}^i d_{est(s,k)}$  or  $c_x \leq c_{(s)}$  then
13:      Concatenate  $p_{(s,0)}$  to  $p_{(s,d)}$  as a decided path for  $s$ .
14:    else
15:       $n_s \leftarrow n_d, i \leftarrow i + 1$ .
16:    end for
17:  end for
18: return path,  $p_{(s)}$ , for  $s \in S_{tx}$ , and transmission data size
    to  $i$ th ground station,  $d_{est(s,d)}$ .

```

4.2.1. シミュレーション評価

提案法の有効性を確認するため、はじめに、直接伝送における送信データサイズ特性を OPNET[55]を用いて評価する。なお、OPNET で低軌道周回衛星を評価するにあたっては、System Took Kit[56]で予め衛星軌道情報を生成し、エフェメリスデータに変換した後に OPNET のノード移動モデルへ設定することで実現している。そして、本評価結果を踏まえて LEO ネットワークにおけるデータ伝送特性とデータ伝送確率を Python [57]の networkx を用いたモンテカルロシミュレーションにより評価する。ここで、伝送確率とは図 4-4 に示すように、衛星が生成したデータサイズを一回の試行で地上局へ全て伝送できる衛星数の割合と定義する。評価条件を表 4-1 に示す。OPNET による評価では評価条件 1 から 5 を用い、Python による評価では評価条件 6 から 10 を用いている。また、データが発生する衛星 ID、地上局と通信可能な衛星 ID は試行毎にランダムに決定し、データ生成サイズは平均データサイズを中心にランダムに決定している。さらに、Python による評価では、データ発生時刻において、任意の衛星が地上局の運用仰角以上に位置することを想定し、OPNET の評価で得られた通信可能時間を 0 から 1 の間の乱数で乗算して可視時間を限定している。

表 4-1 評価条件

| No | 項目 | 値 |
|----|------------|-----------------------------|
| 1 | 衛星高度 | 600km |
| 2 | 衛星軌道 | 太陽同期準回帰軌道 回帰日数 30 日 |
| 3 | シミュレーション時間 | 30 日 |
| 4 | アンテナ径 | 衛星：30cm 地上局：5m |
| 5 | 電波伝搬減衰 | ・自由空間 ・降雨減衰(不稼働率 1%)[35] |
| 6 | 衛星数 | 128 (16 機×8 軌道面) |
| 7 | 地上局数 | 1～128 |
| 8 | 同時データ発生数 | 8,16,32,64 |
| 9 | 平均データサイズ | 575Gbit [5] |
| 10 | 送信帯域幅 | 500MHz |

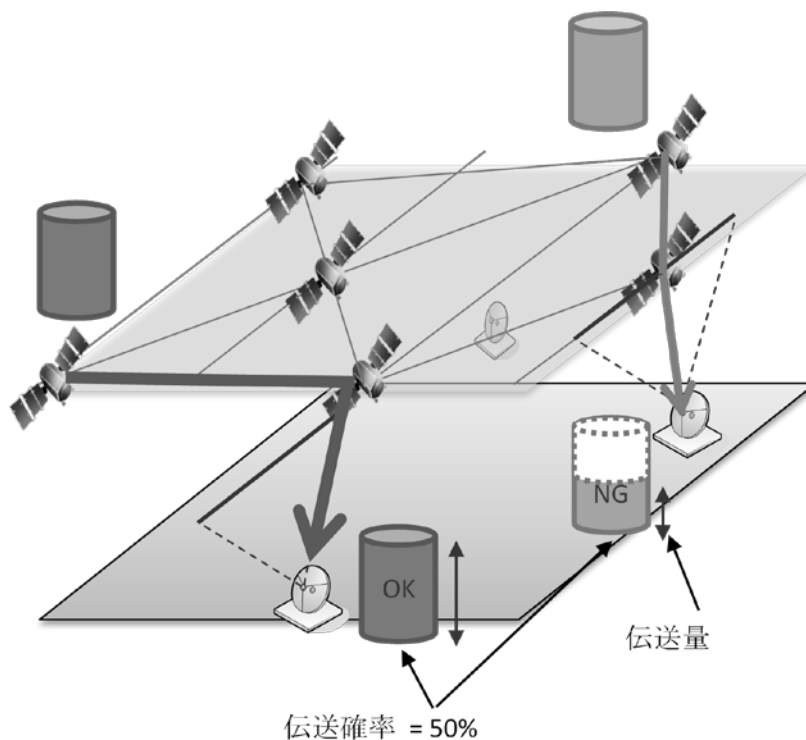


図 4-4 伝送量と伝送確率の定義

4.2.1.1. パスあたりの伝送容量特性

図 4-5 に 1 パスあたりの送信時間と送信データサイズの関係を示す。評価では、[51]で規定されている MODCOD テーブルを VCM に適用している。送信時間のばらつきは衛星軌道と地上局の位置関係に応じて変化しており、特に最小値と最大値では約 6 倍の差がある。一方、送信データサイズは VCM の効果により 6 倍以上の差を示している。仮に送信帯域を 500MHz と過程した場合、平均データサイズは 768Gbit である。しかし、前節で示したように、データ生成タイミングで必ずしも地上局の全ての運用仰角で通信できるとは限らないため、平均的には上記の半分のデータサイズ 386Gbit の送信が見込まれる。

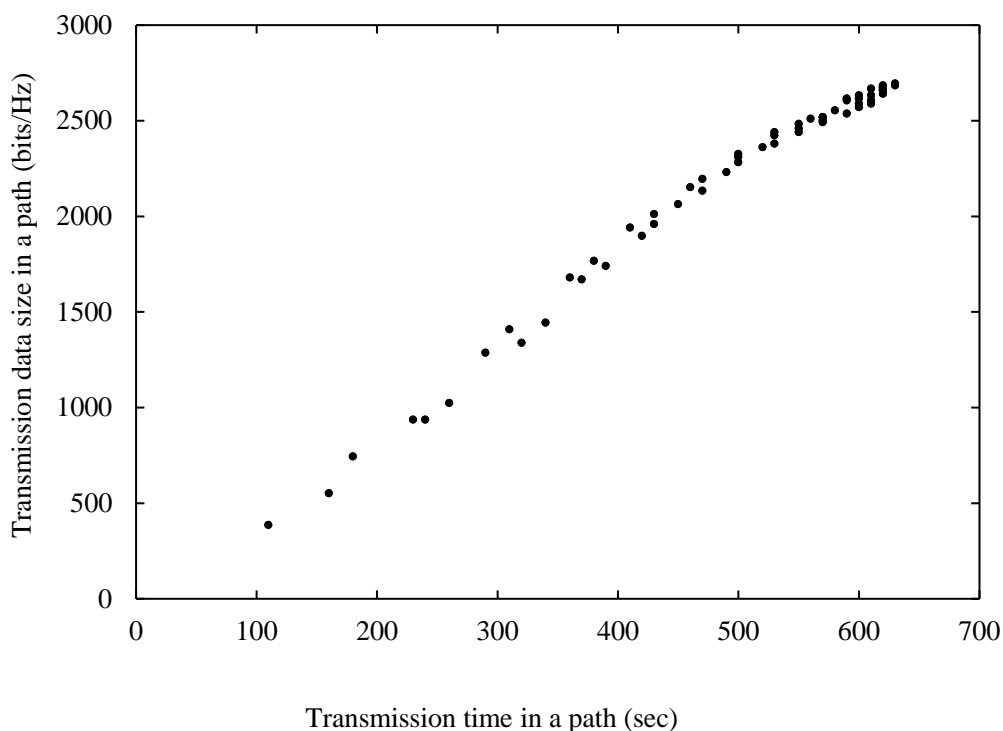


図 4-5 送信時間対送信データサイズ特性

4.2.1.2. ネットワーク容量と伝送確率

図 4-5 の評価結果を踏まえ、図 4-6 から図 4-9 に LEO ネットワークにおける伝送容量を示す。また、図 4-10 から図 4-13 に伝送確率を示す。両結果において地上局は 1 から 128 まで変えており、同時データ生成数も 8 から 64 まで変えている。また、凡例の $c_x = 1$ が従来法であり、 $c_x = 2,3,4$ が提案法である。

図 4-6 から図 4-9 より、従来の 1 局にのみ送信する場合は、平均データ生成サイズが平均送信データサイズを上回ることから全てのデータを一回の送信機会ですべて送信することができず、伝送確率が低下する。一方、提案法は複数の地上局へ同時にデータを送信することができ、特に、最大 4 同時送信することで送信データサイズは平均データ生成サイズに達することが可能となる。また、図 4-10 から図 4-13 に示すように伝送確率は衛星が備える送信機の数、 c_x の増加に伴い改善し、特に、最大 4 同時送信とすることで伝送確率は約 99% を達成する。さらに、図 4-10 から図 4-13 は、同時観測機数と地上局数の関係性を示しており、同時観測機数の約 2 倍の地上局を有することで十分な伝送確率を満たすことがわかる。

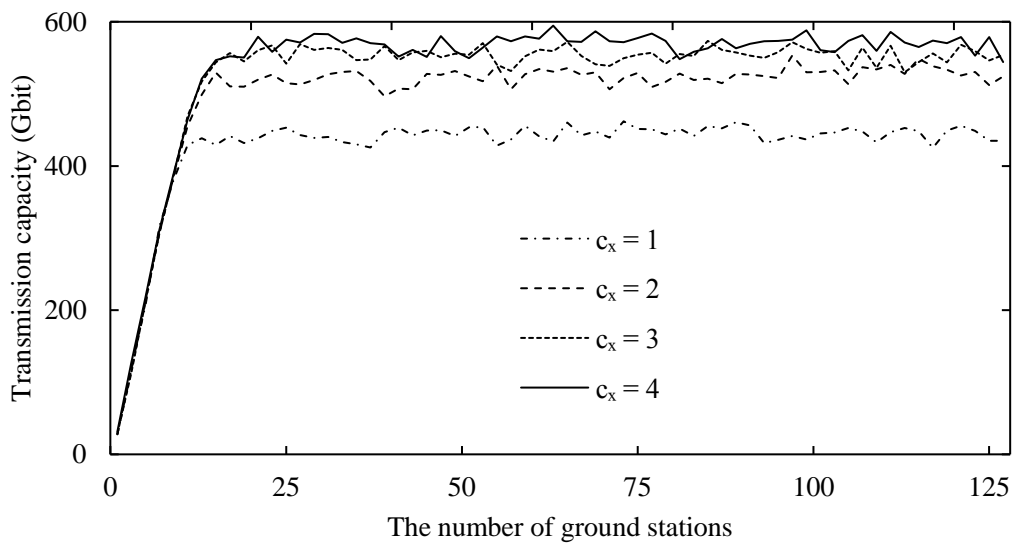


図 4-6 伝送容量対地上局数特性 (a) $N_d=8$

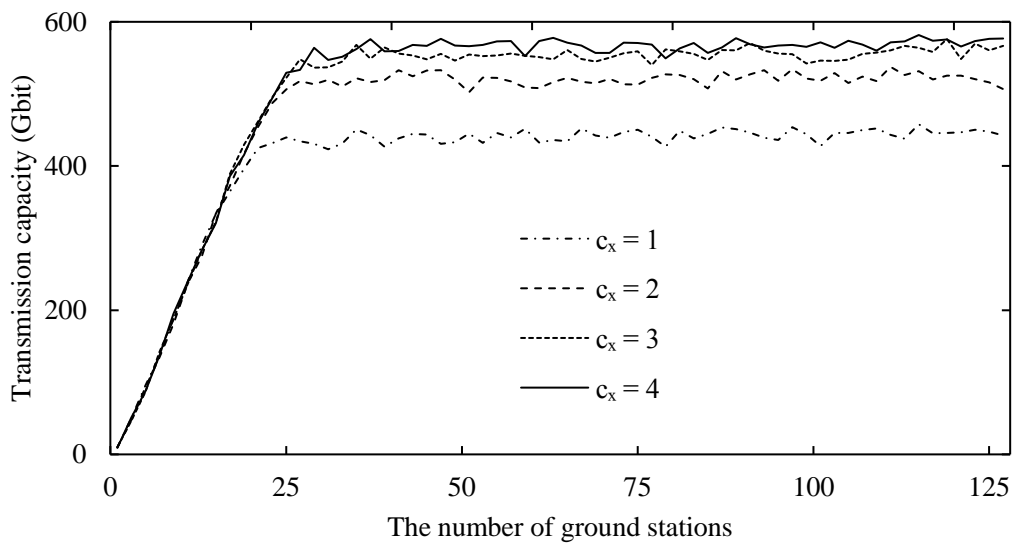


図 4-7 伝送容量対地上局数特性 (b) $N_d=16$

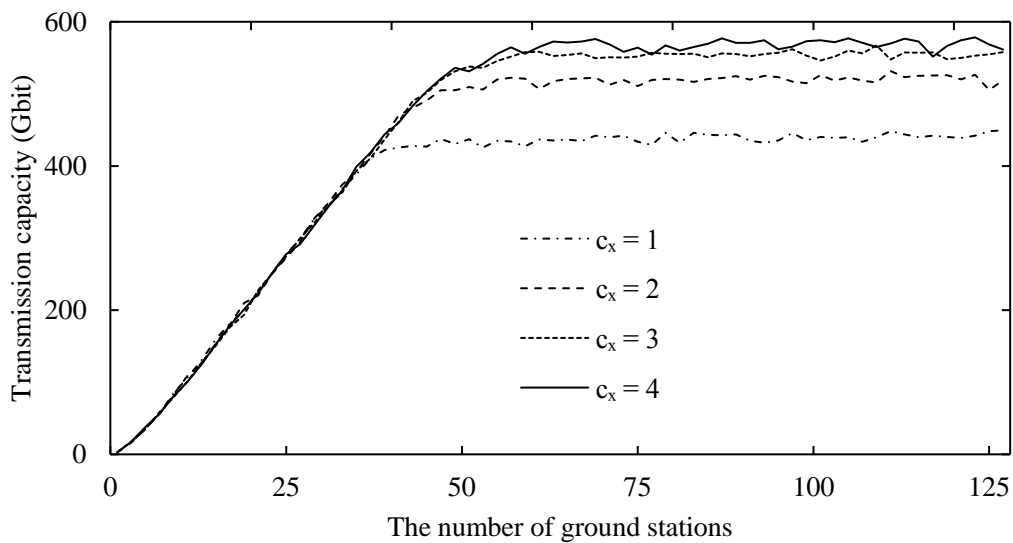


図 4-8 伝送容量対地上局数特性 (c) $N_d=32$

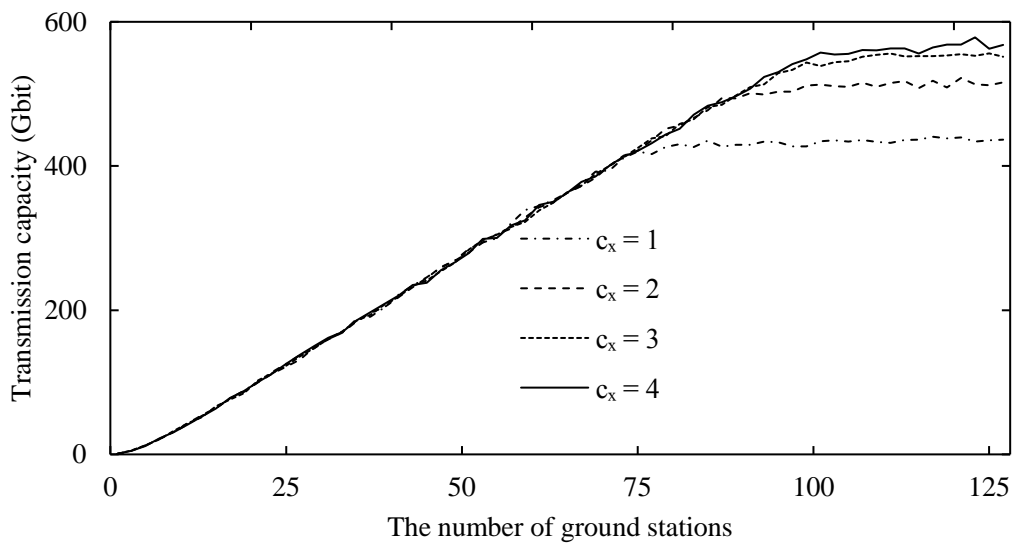


図 4-9 伝送容量対地上局数特性 (d) $N_d=64$

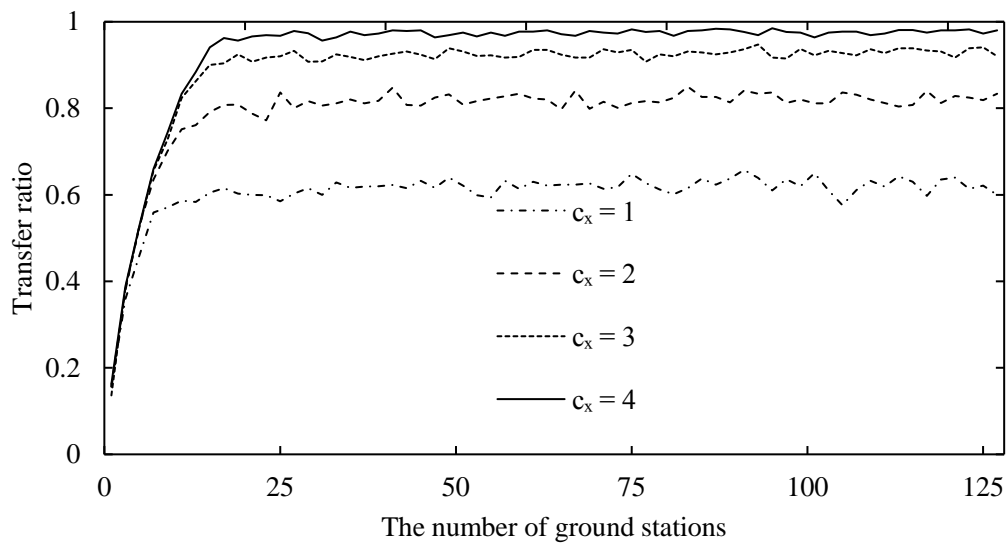


図 4-10 伝送確率対地上局数特性 (a) $N_d=8$

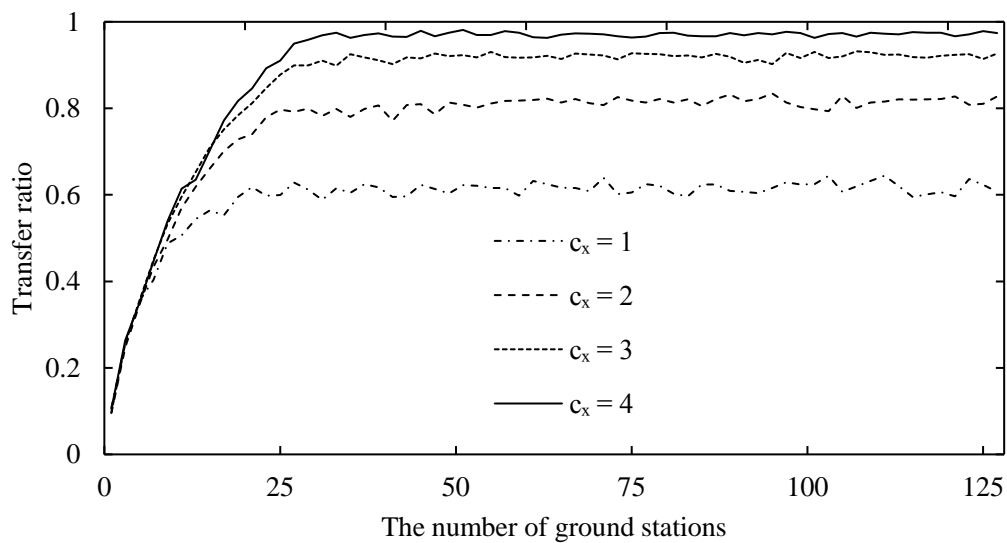


図 4-11 伝送確率対地上局数特性 (b) $N_d=16$

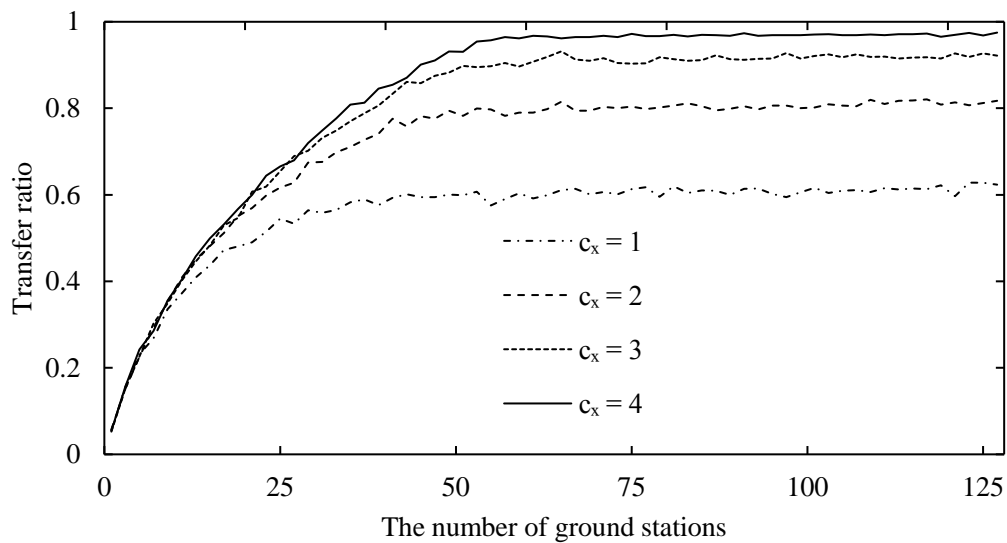


図 4-12 伝送確率対地上局数特性 (c) $N_d=32$

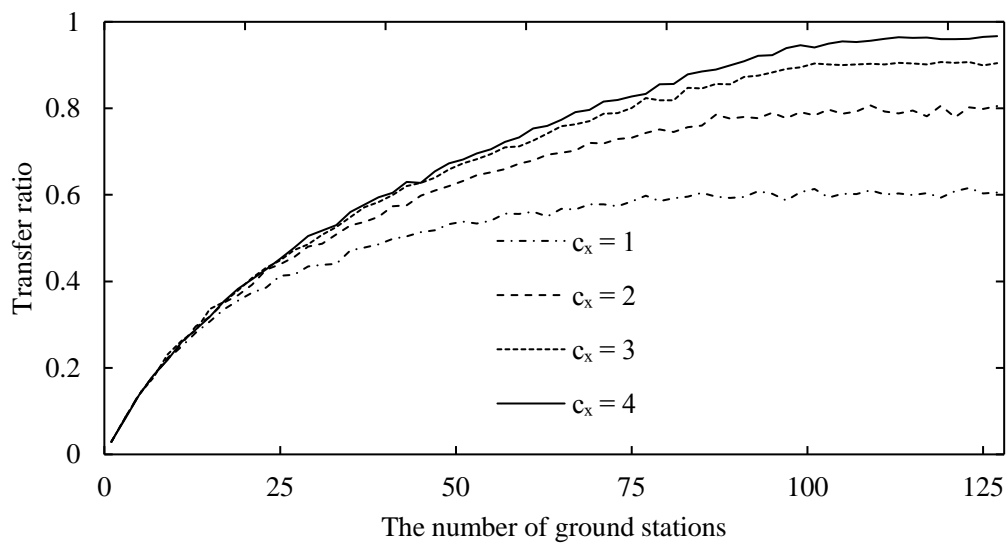


図 4-13 伝送確率対地上局数特性 (d) $N_d=64$

4.3. マルチキャリア・マルチモード変調器の試作開発

前章で示したマルチキャリア・マルチホップ伝送を実現するためには、マルチキャリア化、多値変調化、送信電力の増大を満足する変調器が必要である。特に送信電力については大電力増幅器 TWTA (Traveling Wave Tube Amplifier) の性能が回線設計上の制約となるため、既存の入手可能な増幅器を用いて大電力化を図る手段を確立する必要がある。これらを実現する変調器として、周波数多重と電力合成モードを切り替え可能なマルチキャリア・マルチモード変調器を提案する。

図 4-14 提案方式の概略図を示す。本方式では、複数の小電力増幅器出力で波の位相を揃えて合成し、大電力増幅器並みの性能を実現するものであり、位相が正確に合うよう、高速に位相制御している。本方式を用いることで、図 4-15 に示すように、例えば低仰角で降雨減衰が大きい環境では電力合成モードで送信して高稼働率を維持し、高仰角で降雨減衰が小さい環境では周波数多重モードで送信することで、広帯域伝送を可能とする。

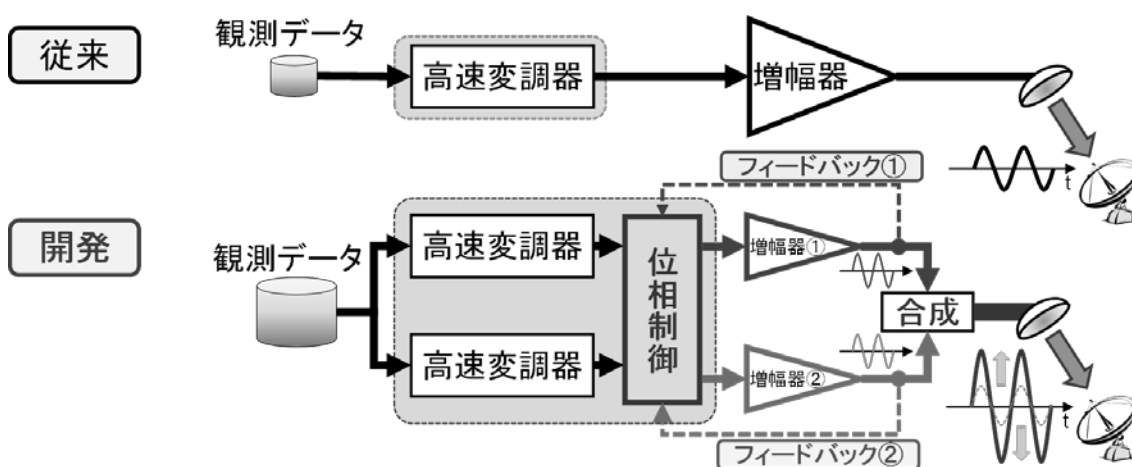


図 4-14 マルチキャリア・マルチモード変調器の概略図

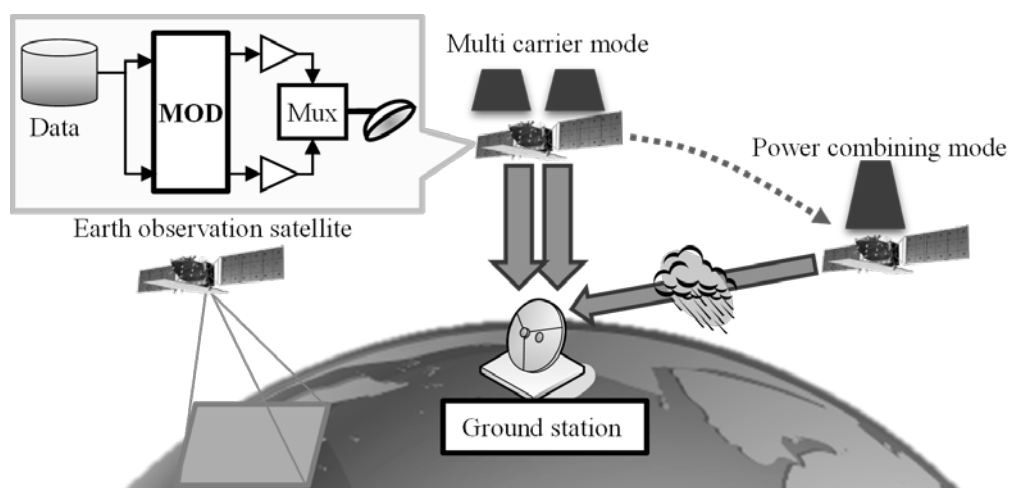


図 4-15 マルチキャリア・マルチモード変調器の送信制御例

図 4-16 に変調器の機能ブロックを示す。また、表 4-2 にマルチキャリア・マルチモード変調器の FPGA(Field Programmable Gate Array)に実装する機能及び諸元を示す。観測データを任意の変調方式にシンボルマッピングし、2 倍 OVS で波形整形を施した後に、予等化フィルタでアナログ系の周波数特性を補償し、直交変調, SINC 補正を行い Digital Analog Converter (DAC) でアナログ変換する。2 系統の DAC 出力は, Intermediate Frequency (IF) → Radio Frequency (RF) に周波数変換した後に、それぞれ Power Amplifier (PA) で増幅して合成出力する。ここで、周波数多重モードの場合はローカル(Lo)の周波数をそれぞれ異なる値に設定し、電力合成モードでは同じ値に設定することで、各モードを切り替える。なお、電力合成モード時の位相変動を制御するため、2 系統の PA 出力信号を共通のローカルで IF にダウンコンバートしてフィードバックする。フィードバックした信号から 2 系統の位相差を検出し、位相差が目標位相となるよう比例制御で位相補正を行う。

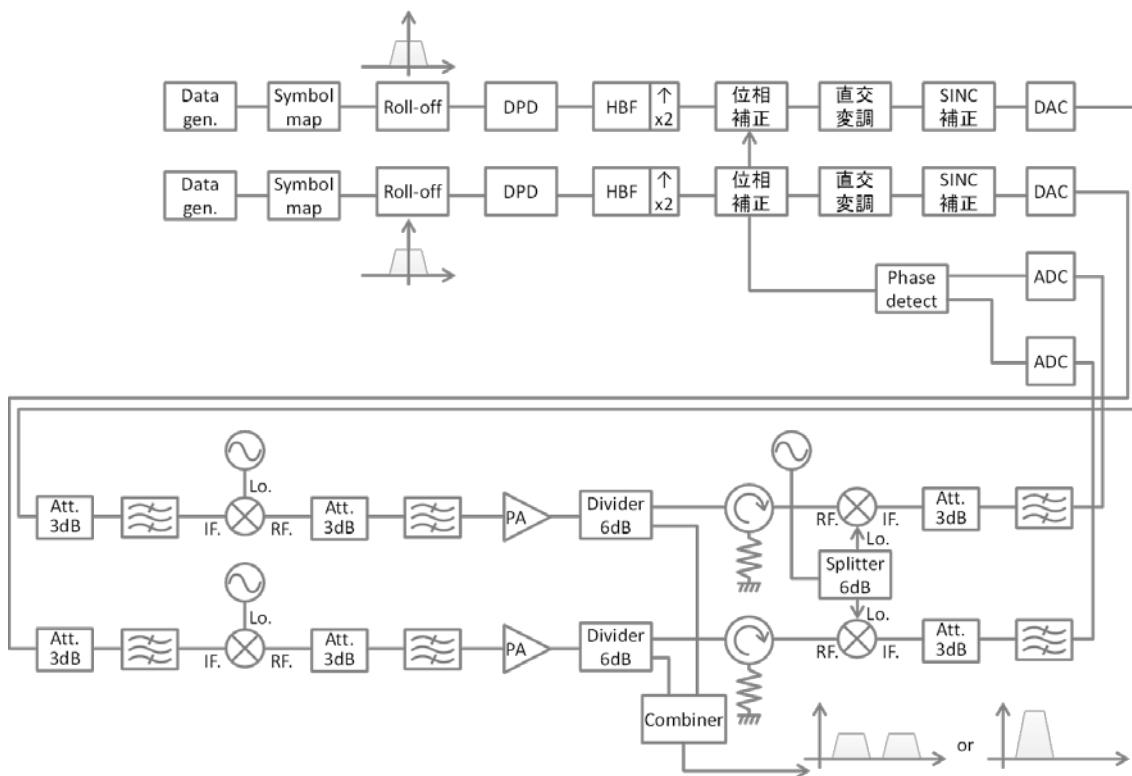


図 4-16 機能ブロック

表 4-2 機能・諸元

| 項目 | 内容 |
|----------------|---|
| 変調方式 | 32QAM, 16QAM, QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK, 64QAM, 64APSK |
| 誤り訂正 | 無し |
| データパターン | ランダムパターン (PN11,15 段) |
| 送信波形整形 フィルタ | <ul style="list-style-type: none"> ・ 2 倍 OVS 型 ・ ロールオフ率=20%, 40%, 50% ・ フィルタ応答: ルートロールオフ |
| 予等化フィルタ | アナログ BPF 特性の逆特性により, 波形歪みを補正する. |
| 2 倍補間フィルタ | <ul style="list-style-type: none"> ・ 2 倍 OVS 型 ・ フィルタ応答: フルロールオフ |
| 直交変調 | ベースバンド信号を直交変調した後に SINC 補正して D/A へ出力 |
| 位相差検出補正機能 | 各チャンネルのローカル周波数偏差, フィルタ, アンプの位相差を検出し, NCO で補正するための補正值を生成する. |

4.3.1. 試作評価

図 4-17 に試作検証のハードウェア構成を示す. また, 図 4-18 に実機構成を示す. 変調器は Xilinx 製の Virtex7 を載せた評価ボード VC707 を用い, DAC, ADC はいずれも 4DSP 製の評価ボード FMC230, FMC126 を用いた. なお, FMC 評価ボードが VC707 に一つしか挿せない都合上, 送信系と受信系で個別に VC707 を用い, VC707 間は FMC to FMC ケーブルで接続した. なお, 本検証では増幅器は線形領域で評価している.

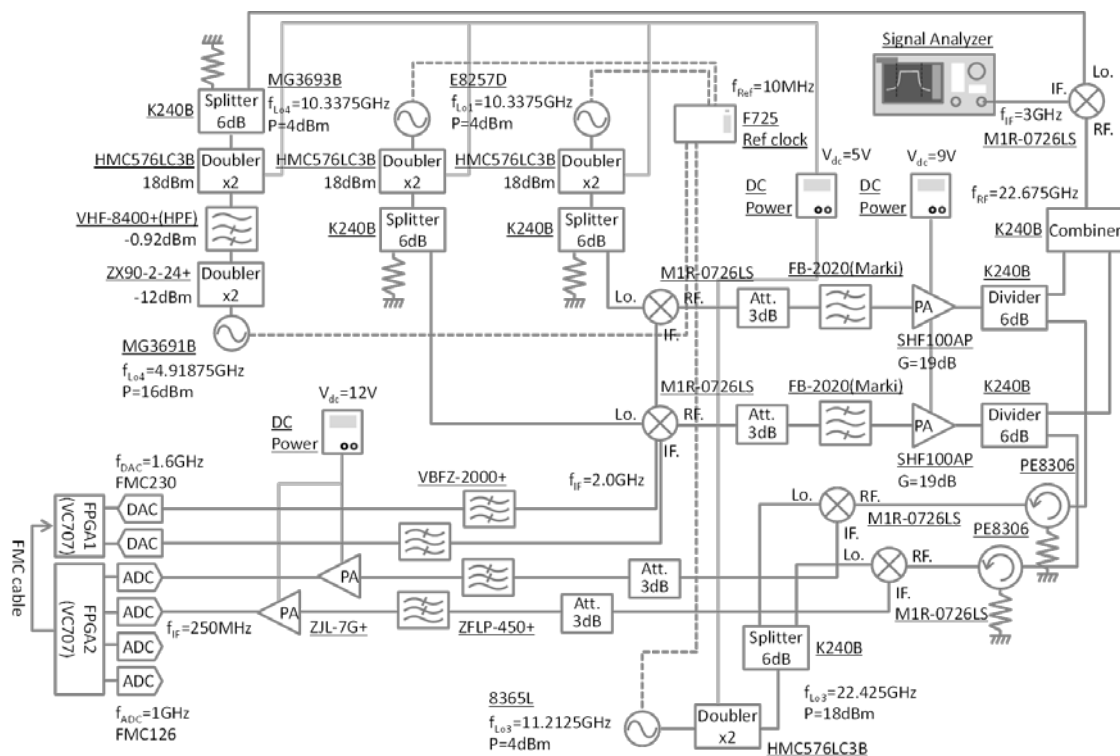


図 4-17 ハードウェア構成

表 4-3 に試作検証の評価条件を示す.

表 4-3 評価条件

| 項目 | 値 |
|-------------|-------------------------|
| RF 周波数 | 22.675 GHz |
| 測定 IF 周波数 | 3.0GHz / 3.75GHz |
| 測定平均回数 N | 40 |
| 受信イコライザタップ数 | 21 symbols |
| 測定シンボル数 | $N \times 2011$ symbols |
| 位相平均化回数 | 1000×5 並列 |

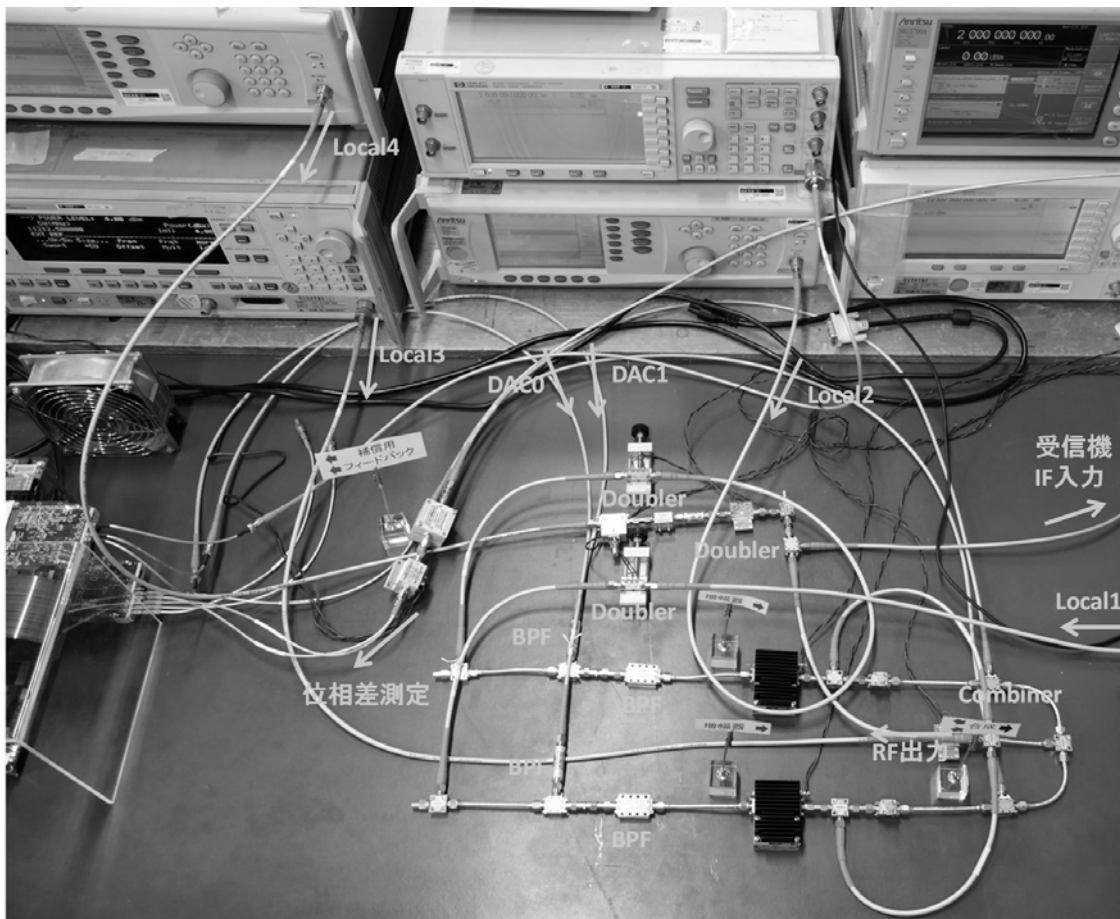
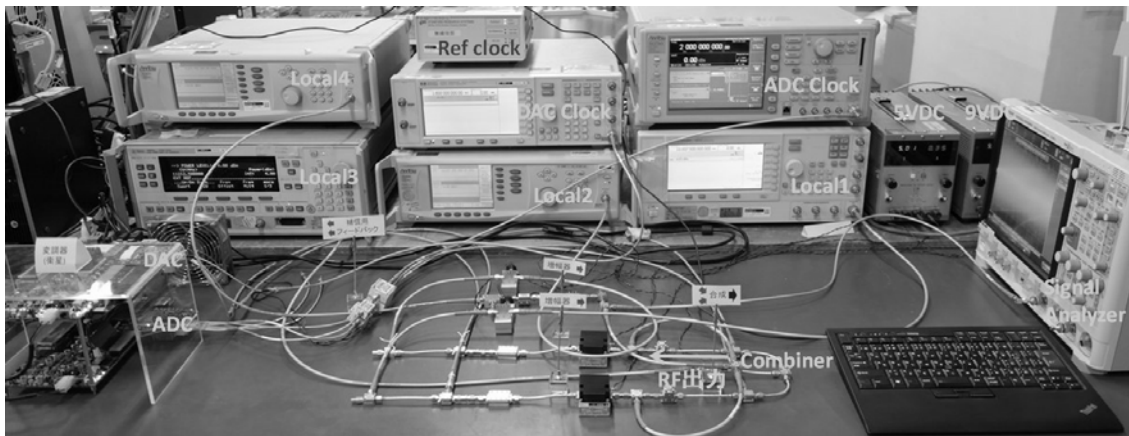
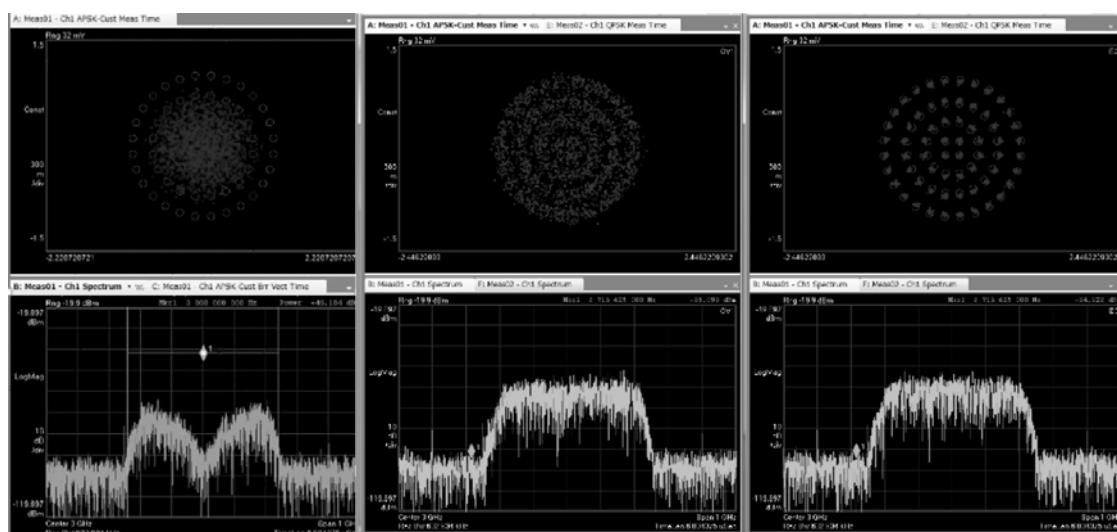


図 4-18 実機構成

図 4-19 に試作器の出力を測定器で取得したコンステ及びスペクトラムを示す. (a) 電力合成モードで送信イコライザと位相制御を OFF にした場合, 周波数歪み及び位相回転共に補償されないことからコンステとスペクトラムは共に崩れ, 復調できない. (b) 送信イコライザ ON, 位相制御 OFF の場合, スペクトラムの崩れは軽減されるが, 異なる位相回転を有するローカルでアップコンバートした信号を合成する影響で, APSK の信号は位相が定まらない. 一方, (c) 送信イコライザと周波数制御を共に ON にすることで, コンステとスペクトラム共に乱れなく, 正しく 2 系統の信号を合成することができている.



(a) Eq. off, phase cnt. off (b) Eq. on, phase cnt. off, (c) Eq. on, phase cnt. on

図 4-19 コンステ, スペクトラム特性

図 4-20 に各変調方式における Error Vector Magnitude (EVM) 特性を示す. 全ての変調方式において EVM は 4%未満であり, SNR に換算($=20\log(EVM/100)$)すると約 28dB となる. 最も変調多値数の高い 64APSK では, 表 4-4 より所要 E_s/N_0 が 16.55dB であることから, 11dB 以上のマージンがあり, 受信側の雑音成分を考慮しても十分な回線品質を保つことが見込める. なお, 周波数多重モードと比較して電力合成モードの EVM が 0.5%程度良い結果となっているが, これは測定器(ロジアナ)の雑音レベルに起因したものと考えられ, 電力合成モードのほうが周波数多重モードより測定器での受信電力が高い, 即ち SNR が高く見えているものと推測する.

図 4-21 に送信電力特性を示す. 理想的には電力合成モードは周波数多重モードと比較して 2 倍(3dB)の電力増となるが, 実機評価の構成上, 周波数多重モードは合成器で 3dB の分配損が生じるため, 理想的には 4 倍(6dB)の差となる. これに対し, 実機評価結果では, 5.8dB の電力増となった. つまり, 3dB の分配損を考慮しない場合 2.8dB の電力増となる. なお, 本評価結果では示していないが, ローカルを共通にした場合と比較して約 0.1dB の電力低下にとどまることを確認している.

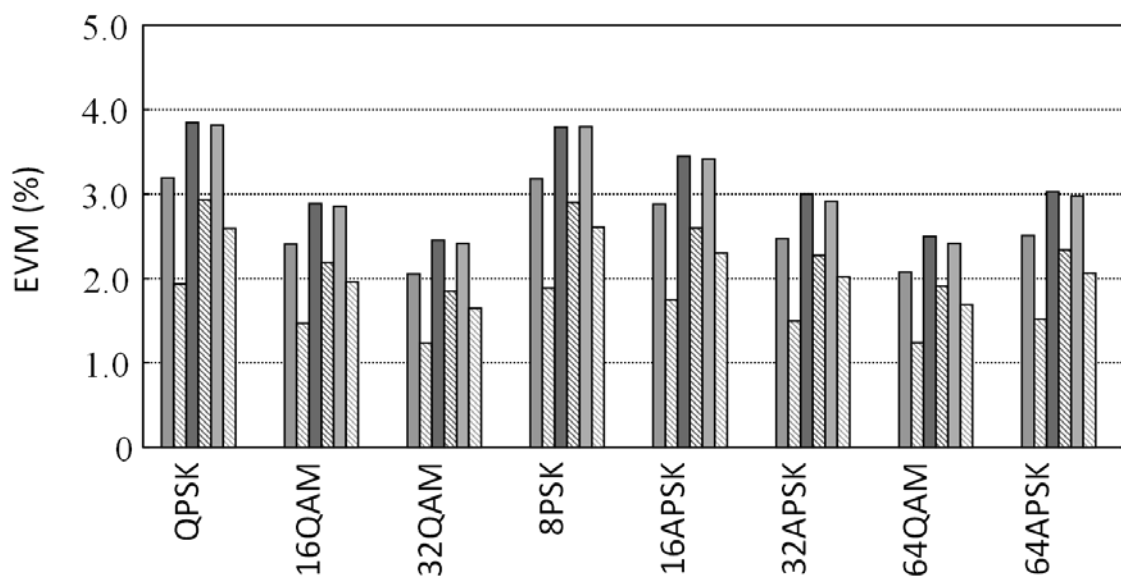


図 4-20 EVM 特性

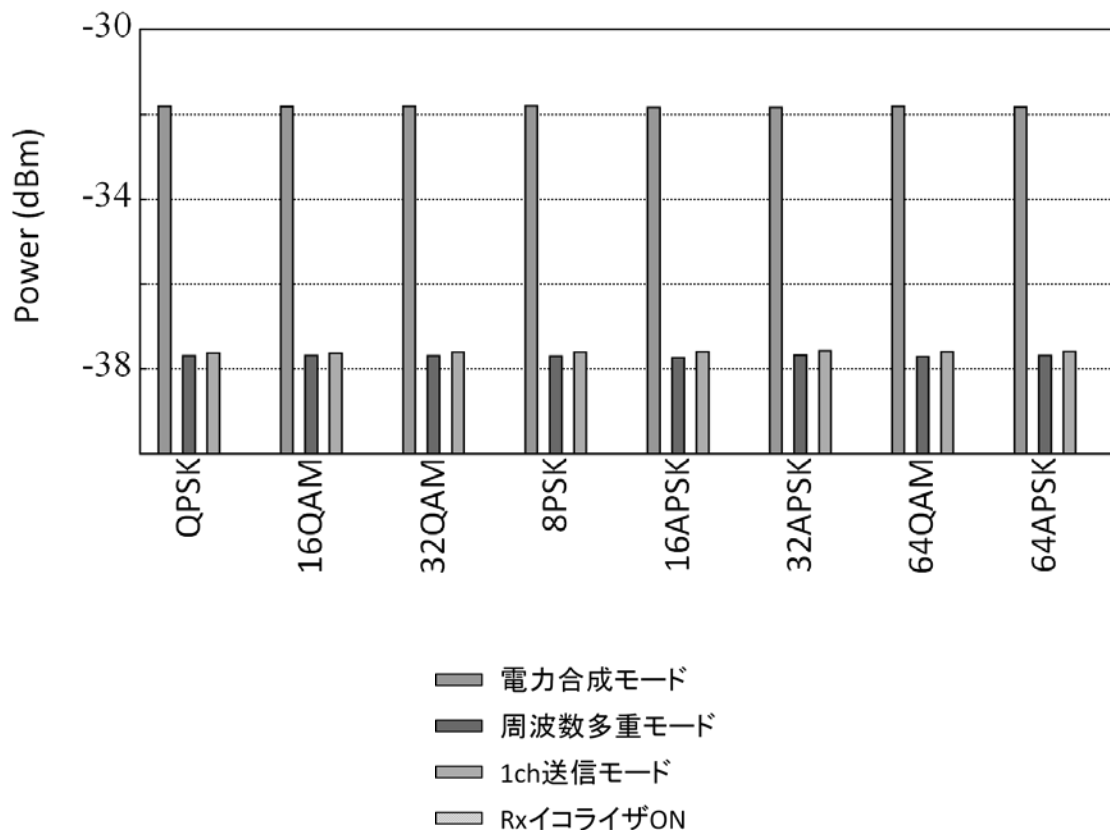


図 4-21 電力特性

表 4-4 DVB-S2X における MODCOD テーブル

| Canonical MODCOD | | Spectral efficiency [bit/symbol] | Ideal Es/N0 [dB] |
|------------------|---------|----------------------------------|------------------|
| QPSK | 2/9 | 0.434841 | -2.85 |
| QPSK | 13/45 | 0.567805 | -2.03 |
| QPSK | 9/20 | 0.889135 | 0.22 |
| QPSK | 11/20 | 1.088581 | 1.45 |
| 8APSK | 5/9-L | 1.647211 | 4.73 |
| 8APSK | 26/45-L | 1.713601 | 5.13 |
| 8PSK | 23/36 | 1.896173 | 6.12 |
| 8PSK | 25/36 | 2.062148 | 7.02 |
| 8PSK | 13/18 | 2.145136 | 7.49 |

| | | | |
|---------|---------|----------|-------|
| 16APSK | 1/2-L | 1.972253 | 5.97 |
| 16APSK | 8/15-L | 2.10485 | 6.55 |
| 16APSK | 5/9-L | 2.193247 | 6.84 |
| 16APSK | 26/45 | 2.281645 | 7.51 |
| 16APSK | 3/5 | 2.370043 | 7.8 |
| 16APSK | 3/5-L | 2.370043 | 7.41 |
| 16APSK | 28/45 | 2.458441 | 8.1 |
| 16APSK | 23/36 | 2.524739 | 8.38 |
| 16APSK | 2/3-L | 2.635236 | 8.43 |
| 16APSK | 25/36 | 2.745734 | 9.27 |
| 16APSK | 13/18 | 2.856231 | 9.71 |
| 16APSK | 7/9 | 3.077225 | 10.65 |
| 16APSK | 77/90 | 3.386618 | 11.99 |
| 32APSK | 2/3-L | 3.289502 | 11.1 |
| 32APSK | 32/45 | 3.510192 | 11.75 |
| 32APSK | 11/15 | 3.620536 | 12.17 |
| 32APSK | 7/9 | 3.841226 | 13.05 |
| 64APSK | 32/45-L | 4.206428 | 13.98 |
| 64APSK | 11/15 | 4.338659 | 14.81 |
| 64APSK | 7/9 | 4.603122 | 15.47 |
| 64APSK | 4/5 | 4.735354 | 15.87 |
| 64APSK | 5/6 | 4.933701 | 16.55 |
| 128APSK | 3/4 | 5.163248 | 17.73 |
| 128APSK | 7/9 | 5.355556 | 18.53 |
| 256APSK | 29/45-L | 5.06569 | 16.98 |
| 256APSK | 2/3-L | 5.241514 | 17.24 |
| 256APSK | 31/45-L | 5.417338 | 18.1 |
| 256APSK | 32/45 | 5.593162 | 18.59 |
| 256APSK | 11/15-L | 5.768987 | 18.84 |
| 256APSK | 3/4 | 5.900855 | 19.57 |

4.4. 局所的なトラフィック増大に対する周波数割当法

自然災害が生活に与えるリスクを低減するためには、迅速な状況把握と対処が重要となる。状況把握の観点でリアルタイム観測システムの構築は有用であり、前章までに示した低遅延伝送を実現する衛星間伝送に加え、HTSを用いたハイブリッドネットワークが有効な手段である。そこで本章では日本近郊でハイブリッドネットワークを構築する場合を想定し、ビーム配置と周波数配置の検討を行った後に、解決すべき課題について述べる。

4.4.1. システムモデル

図 4-22 に HTS のシステム構成を示す。各端末は衛星が照射する複数のビームに在圏し、衛星を介してゲートウェイと送受信する。現在実用化されている HTS は、数十ビームでカバレッジエリアを覆い、システム全体で 100Gbit/s 級の通信容量を実現している。周波数プランについては、ユーザリンクを 2 周波数、2 偏波(LHCP: Left Hand Circular Polarization, RHCP: Right Hand Circular Polarization)の 4 色繰り返しで構成する。しかし、多数のビームでカバレッジエリアを覆う場合、フィーダリンクの周波数が枯渇するため、ゲートウェイを地理的に離れた場所に複数配置し、フィーダリンクの周波数を再利用することでユーザリンクのビーム数を増大する。

図 4-23 に、ビーム径を HTS の代表例に合わせて 400km[58]とし、東経 135 度、北緯 35 度を中心にビームを三角配置した場合のビーム配置を示す。要求カバーエリアを排他的経済水域(図中の点線)とすると、これをほぼカバーするためには 39 ビームを要する。また、陸域(北海道、本州、四国、九州、沖縄)をカバーするのは 9 ビーム程度になると想定される。

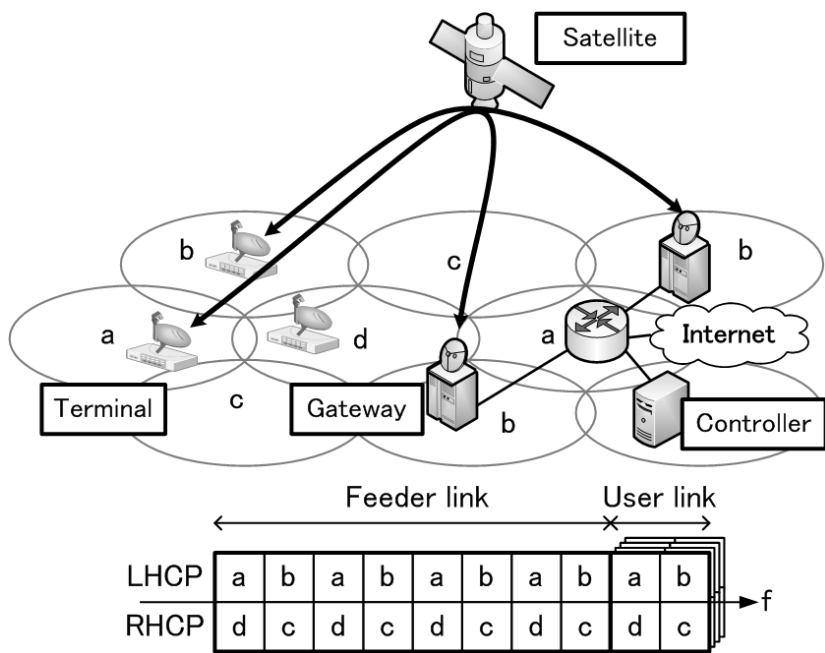


図 4-22 HTS のシステム構成

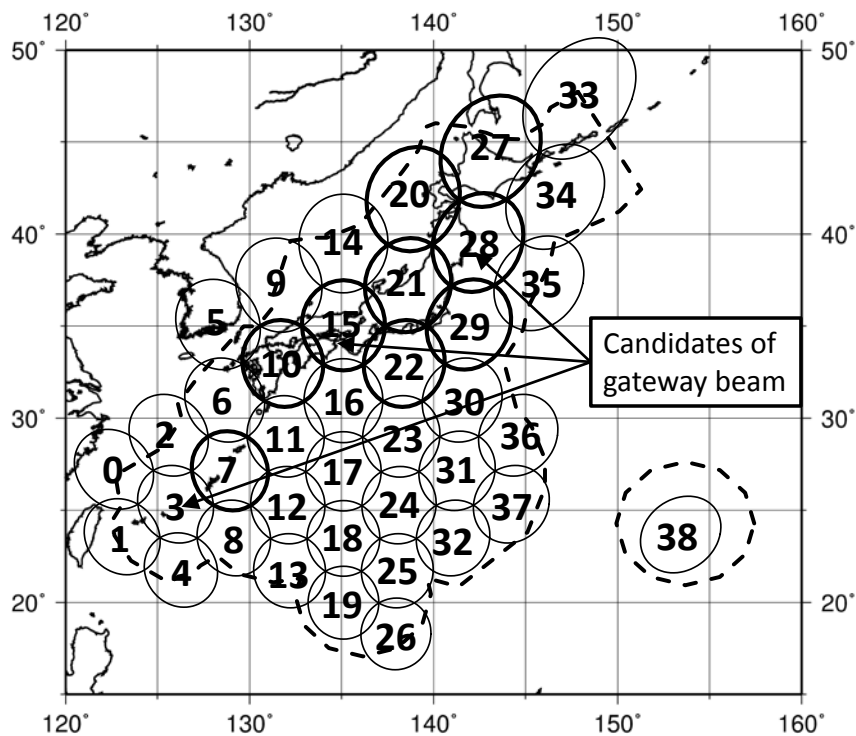


図 4-23 HTS のビーム配置例

次に、周波数プランについて検討する。図 4-22 に示したように、各ビームへ等しく周波数を割り当てることとした場合、上りリンク及び下りリンクのシステム帯域 B_U, B_D は、各ビームにおける上りリンク及び下りリンクの帯域幅 W_U, W_D 、ビーム数 N_b 、偏波数 N_p 、周波数繰り返し数 N_f 、フィードリンク数 N_g とすると次式で表せる。

$$B_U = N_f W_U + \frac{N_b W_D}{N_p N_g} \quad (4.1)$$

$$B_D = N_f W_D + \frac{N_b W_U}{N_p N_g} \quad (4.2)$$

ここで、文献[23]を参考にシステム帯域 B_U, B_D を 2.5GHz、ビーム帯域 W_U, W_D を 250MHz、偏波数 N_p を 2、周波数繰り返し数 N_f を 2 とし、ビーム数 N_b を図 4-23 で示したように 39 とすると、式(1)よりフィードリンク数 N_g は 2.4375 となる。よって、フィードリンク周波数を 3 回以上再利用する必要がある。しかし、フィードリンクを送受信するゲートウェイの配置について着目すると、カバレッジエリアの大半が海域となる場合、図 4-23 に示したように、陸域 9 ビームのうち、フィードリンクを 1 周波数繰り返しで再利用できるビーム、即ちゲートウェイを設置可能なビームは最大 3 ビームに限定される。また、ゲートウェイの冗長構成を考慮し、3 ビーム中 1 ビームのゲートウェイを待機させた場合、同時運用できるゲートウェイビーム数は 2 となる。よって、既存の HTS と比較すると、少数のゲートウェイで要求されるシステムスループットを実現する必要がある。

また、南海トラフ巨大地震[59]を想定した場合、被害想定地域は、図 4-23 に示したビーム配置において 4 ビーム(ビーム番号 10,15,21,22)で覆われる。災害直後は地上の通信インフラが機能不全に陥り、当該ビームでは衛星通信への需要が爆発的に増加することが見込まれる[60]。例えば、東日本大震災の発災後は携帯網に対して通常時の 50 倍以上のトラヒック要求があり、衛星通信事業者が 500MHz の追加割当を行った[61][62]。本事例を背景に、近年は、携帯網などの通信インフラが機能不全になった場合に備え、早期に通信環境を構築するレジリエントネットワークの研究が多くなされており、Wireless Mesh Network (WMN) [63], Device to Device (D2D) communication [64], UAV multi-hop network [65]などが有効である。しかし、いずれの手法も局所的なカバレッジエリア形成に資するものの、当該エリア外に対するバックボーン回線は依然として必要であり、衛星通信が寄与する[66]。

以下、南海トラフ巨大地震を想定したトラヒック量を見積る。上記被災地をカバーするビームにおいて、地上網の代替手段 15000 台の端末が設置され[67]、1 台あたり平均 1.5Mbit/s の通信を行うとした場合、4 ビーム合計で 22.5Gbit/s となり、各ビームにトラヒックが一樣分布したと仮定すると、1 ビームあたり 5.6Gbit/s の通信需要の増加が想定される。一方、現状の HTS ではビームあたりのスループットは数 100Mbit/s 程度にとどまるため、ユーザリンク帯域を一部のビームに集中的に割り当てる必要がある。さらに、観測衛星が被害想定地域上空で観測を行う場合、上記通信需要に加え観測データの需要分が追加される。

4.4.2. 提案方式

前章で示したように、災害時等で通信・観測需要が局所集中した場合に、広域性を有する衛星通信で上記需要を吸収する手法を示す。

はじめに、図 4-24 に提案方式の制御コンセプトを示す。基本的な制御指針として、通信制御局はネットワークの通信要求量と、衛星の負荷状態を監視し、数時間単位の定常的なトラヒック変動に追従するように closed loop control を行う。ここで、通信制御局は 2 種の伝送制御を行う。ユーザレベルスケジューリングは、各ユーザの要求レートに基づき、ユーザ間のフェアネス性を考慮した帯域割当を行う。また、ビームレベルスケジューリングは、ビーム間のトラヒック不均一性が生じた場合に、各ビーム内の要求レートを満たすようにビーム帯域を割り当てる。

一方、災害時など局所的に通信・観測需要が急増する場合、予め需要を予測することは困難である。また、非定常状態では closed loop control でネットワークの状態を正確に監視し、帯域割当することができない。このようなケースに対応するため、通信制御局は予期されるシナリオと対応するプロファイル(ビーム帯域やビーム間接続)を複数備え、リソース管理部が最も現在の状態に類似するシナリオをオープンループで決定してプロファイルを適用する。並行して、リソース管理部はネットワーク状態を継続監視し、初期プロファイルを基に、ビーム帯域を更新する。なお、上述したようにプロファイルを開閉ループで適用することにより、早期の対応を可能とするが、このような場合においても、平常時から持続的に利用しているセンサなどのアプリケーションへの帯域割当は維持する必要がある。

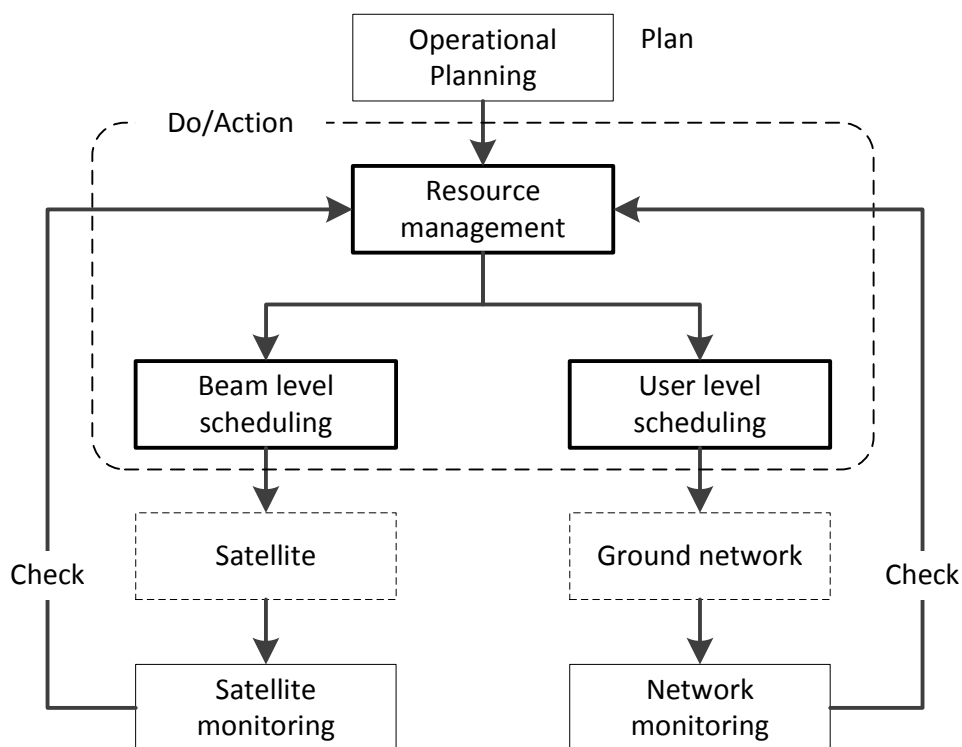


図 4-24 衛星通信システムの制御コンセプト

次に、従来方式であるベントパイプ型と提案方式との周波数割り当ての比較について図 4-25 を用いて説明する。図 4-25 は平常時とトラヒック集中時における、各ビームのユーザリンクとフィーダリンクの関係を示したものである。図 4-25 に示すように、従来のベントパイプ方式は各ビームに割り当て可能な帯域幅が固定のため、予め決められたユーザリンク帯域以上の帯域を割り当てることはできない。一方、提案方式ではユーザリンクとフィーダリンクに割り当てる帯域幅の比率を変更する。これにより、平常時はフィーダリンク帯域の削減が可能となり、少ないゲートウェイ数で要求されるシステムスループットを実現することが期待できる。また、トラヒック集中時は特定のビームに対して広いユーザリンク帯域を割り当てることができる。

なお、衛星打ち上げ後の柔軟な周波数割り当てを実現する手段としては、デジタルチャネライザが有効である。図 4-26 はデジタルチャネライザの構成を示しており、衛星上で受信した信号を複数の周波数帯域に分波(DMX)した後に各分波信号を送信先ビームへスイッチし、再度合波(MUX)して中継する。図 4-26 では、ユーザリンク#1 に帯域を集中した例を示しており、特定のビームで通信需要が増加した場合は、隣接する周辺ビームに割り当てていた周

波数を再割り当てし、通信需要が増加したビームへ周波数を集中的に割り当てることが可能となる。現在は、主に L/S 帯を用いた衛星移動体通信[68]向けにデジタルチャネライザが適用されているが、今後は衛星搭載デバイスが高速化するのに伴い、Ka 帯など広帯域なシステムへも適用されることが見込まれる。

しかし、L/S 帯を用いた移動体衛星通信は、端末と衛星間を結ぶユーザリンクと、ゲートウェイと衛星間を結ぶフィーダリンクの周波数帯がそれぞれ異なることから、デジタルチャネライザを用いて特定のビームへ周波数を集中する場合には、ユーザリンクに割り当てられている帯域幅の範囲内で行うこととなる[69]。よって、上記の考え方を2周波繰り返しの HTS に適用した場合、チャネライザを用いて各ビームへ割り当てられる周波数はベントパイプ型の2倍に留まる。一方、Ka 帯はユーザリンクとフィーダリンクに割当てられる周波数帯が連続していることから、提案方式ではユーザリンクとフィーダリンクに割当てられる周波数の比率を利用可能な帯域幅の中で自由に決めることで、柔軟な周波数割り当てを可能なものとする。

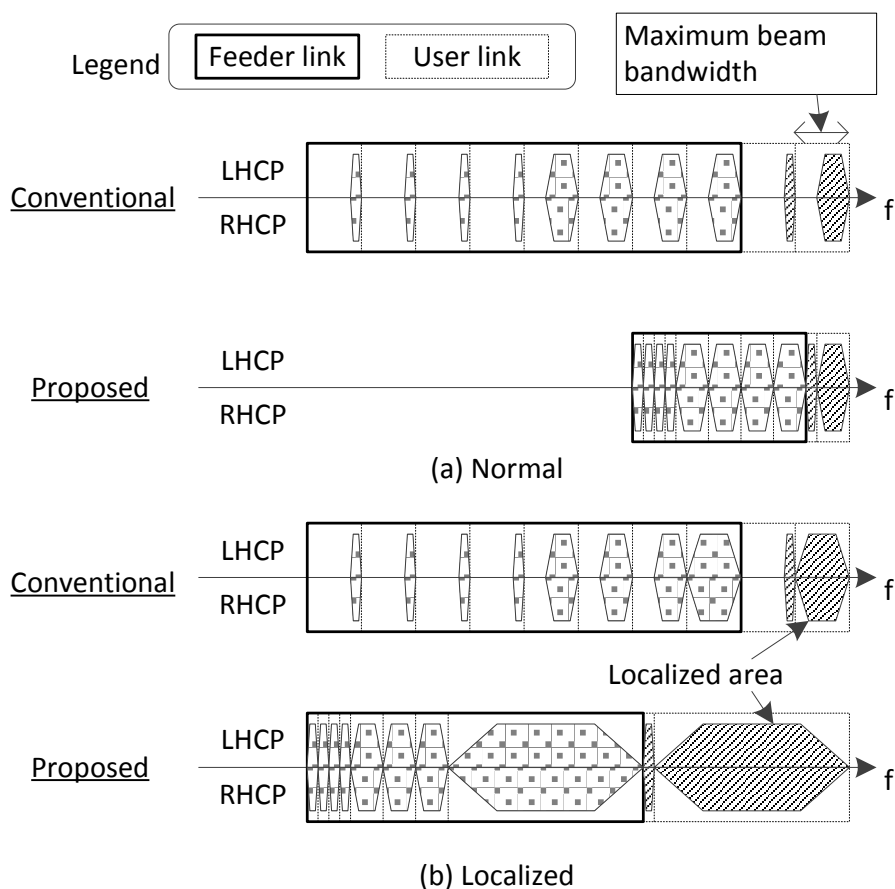


図 4-25 周波数プランの比較

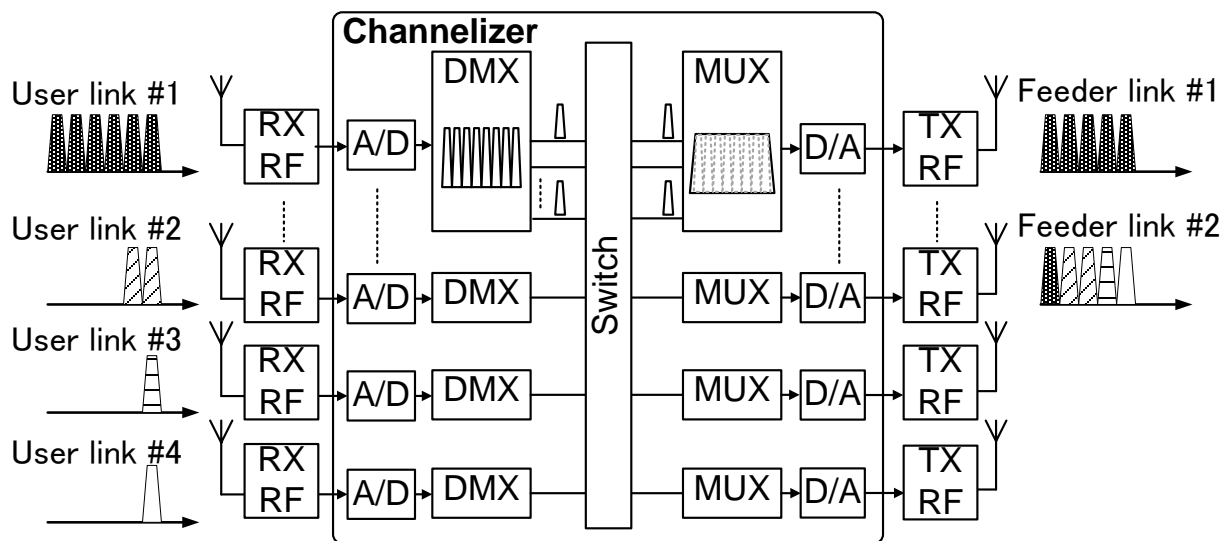


図 4-26 デジタルチャネライザの構成

3.2 回線制御

上述した周波数割り当てを実現するための具体的な回線制御方法を以下に示す。

- (a) 端末及びゲートウェイはデータ発生を契機に制御局に対して回線要求を送信する。
- (b) 制御局は、端末及びゲートウェイに対して新規に周波数割り当てを行う。
- (c) また、通信衛星に対しては、フィーダリンクとユーザリンクの接続関係を示すルーティングテーブルを設定する。
- (d) その後、端末及びゲートウェイは指定された回線を用いてデータを送受信する。
- (e) また、制御局に対して定期的にバッファに滞留するデータ量(バッファ状態)及び回線品質を報告する。
- (f) 制御局は、端末及びゲートウェイから受信した回線品質とバッファ量から各回線のパラメータを更新する。具体的には、各ゲートウェイのフィーダリンク空き帯域に基づいて優先的に使用するゲートウェイを選択し、各ビームに対してユーザリンク周波数を割り当てる。これにより、各ビームの通信需要に応じて無駄なく周波数を割り当てること

でき、通信容量の増大が期待できる。

- (g) そして、端末及びゲートウェイに対して更新した回線割当を通知する。また、通信衛星が中継する周波数とビームの接続関係に変更が生じた場合はルーティングテーブルを更新する。

4.4.2.1. ゲートウェイの選択

ゲートウェイの選択は、以下の手順で行う。はじめに、制御局は直近に受信した各端末の SINR に基づいて所要のビット誤り率を満たすよう ACM を実施する。ACM は表 4-4 に示すように複数の変調方式と符号化率の組み合わせをテーブルに保持し、その中から受信 SINR が所要 SINR を上回る組み合わせ k を決定することで、当該組み合わせにおける 1Hz あたりのビットレート $\alpha(k)$ が求まる。

その後、 i 番目のビームにおける要求帯域 $W_u(i)$ を求めるため、当該ビームに在圏する j 番目の端末に要求される送信レート $r(j)$ と ACM により選択された 1Hz あたりのビットレート $\alpha(k)$ から各端末の要求帯域を求め、ビーム内に在圏する $N(i)$ 個の端末について総和する。また、衛星中継器はチャネライザの最小分波帯域 W_c の整数倍でルーティングを行うこととすると、 i 番目のビームにおける要求帯域は次式のように表せる。

$$W_u(i) = \left[\sum_{j=0}^{N(i)-1} \frac{r(j)}{c(k)W_c} \right] W_c \quad (4.3)$$

一方、 n 番目のゲートウェイのフィードリンクに割り当てられる帯域 $W_f(n)$ は、ゲートウェイを設置したビームを中心とし、周波数または偏波を共用しない周辺ビームが要求するユーザリンク帯域幅を除く周波数を割り当てることができるため、次式のように表せる。

$$W_f(n) = W_s - \max_{0 \leq p \leq P-1} \{W_u(p)\} - \max_{0 \leq q \leq Q-1} \{W_u(q)\} \quad (4.4)$$

ここで、 W_s はシステム全体の帯域幅であり、右辺第二項、第三項はそれぞれユーザリンクに割り当てる帯域幅に相当し、第二項は図 1 における a または d に属するビーム、第三項は

b または c に属するビームである。式(4.4)を用いて、各ゲートウェイに対する上りリンクの右旋偏波 $W_{fru}(n)$ 、左遷偏波 $W_{flu}(n)$ 、下りリンクの右旋偏波 $W_{fud}(n)$ 、左遷偏波 $W_{fud}(n)$ それぞれに割り当て可能なフィーダリンク帯域を求める。全てのゲートウェイのうち、 $W_{fru}(n), W_{flu}(n), W_{fud}(n), W_{fud}(n)$ の総和が最も大きくなるゲートウェイから順番に所要のフィーダリンク帯域を満たすまでゲートウェイを選択して送受信対象とし、残りのゲートウェイは冗長系で待機する。これにより、ベントパイプ型のように各ゲートウェイへ均等にフィーダリンク帯域を割り当てる場合と比較して要求されるシステムスループットを実現するのに必要なゲートウェイの同時稼働数を減らす制御が可能となる。

4.4.2.2. 周波数割り当て

前節で求めた各ビームの要求帯域幅と割り当て可能なフィーダリンク帯域幅より、ユーザリンク及びフィーダリンクに割り当て可能な帯域幅は次式の関係を満たす。

$$\alpha_d \sum_{i=0}^{N-1} W_{Uu}(i) \leq \alpha_d \sum_{k=0}^{K-1} \{W_{flu}(k) + W_{fru}(k)\} \quad (4.5)$$

$$\alpha_u \sum_{i=0}^{N-1} W_{Ud}(i) \leq \alpha_u \sum_{k=0}^{K-1} \{W_{flu}(k) + W_{fru}(k)\} \quad (4.6)$$

ここで、 $W_{Uu}(i), W_{Ud}(i)$ は式(4.3)から求まる i 番目の上りユーザリンク要求帯域、下りユーザリンク要求帯域であり、 N はユーザリンクのビーム数、 K はフィーダリンクのビーム数(同時運用可能なゲートウェイ数と同義)である。また、 α_u, α_d は上りリンクと下りリンクの周波数帯域幅を決定するにあたっての重みづけ係数であり、係数が 1 の場合は全端末が要求する送信レートを満たす周波数を割り当てられることを意味する。一方、過負荷状態においては係数を 1 未満に設定することで各ビームに割り当てる帯域幅を減少させる。

各ビームへ割り当てる帯域幅 $W_b(j)$ と、各端末へ割り当てる帯域幅 $W(j)$ は式(4.5)、式(4.6)で求めた重みづけ係数を用いて表すことができ、便宜的に上下リンク区別せず重みづけ係数を α とした場合、次式となる。

$$W_b(i) = \alpha W_u(i) \quad (4.7)$$

$$W_t(j) = \alpha r(j)c(k) \quad (4.8)$$

4.4.3. 評価

従来のベントパイプ型 HTS に対する提案方式の有効性を確認するため、ビーム毎に異なる通信需要が発生した場合における 1 ビームあたりのスループットと、必要となるゲートウェイ数を評価する。システム帯域は Ka 帯で利用可能な周波数として 2.5GHz、ユーザリンクは 2 周波、2 偏波の 4 色繰り返しとした。陸上と海上のビーム数は図 4-23 に示したビーム配置のとおりとし、海を覆うビーム数を 30、陸を覆うビーム数を 9、うち、被災地を覆うビーム数を 4 とした。提案方式に用いるチャネライザのサブチャネル帯域幅は 1MHz とし、各ビームに割り当てる周波数も 1MHz の整数倍とした。各端末へ割り当てる周波数は、前章で示したように、表 4-4 に記載されたテーブルに基づいて ACM を行った結果得られる bit/s/Hz と要求レートにより決定した。

表 4-5 に本論文で想定する回線あたりの要求通信速度、及びビームあたりの要求通信速度を示す。平常時における海ビームの通信需要は、船舶インターネットを想定した。HTS の潜在需要は衛星船舶の契約数[70]と同程度であり、そのうち 10%の契約者が同時利用していると仮定した。陸ビームの通信需要は国内線の航空機インターネットを想定した。1 か月あたりの国内線の飛行時間は 7 万時間[71]、1 日の飛行可能時間を 16 時間とした場合、1 時間あたりの同時回線数は 150 回線となる。通信需要が集中するケースは前節で示した災害を想定し、図 4-23 におけるビーム番号 10,15,21,22 のトラヒックが増加するものと仮定した。全てのケースにおいて、上りリンクの通信速度は下りリンクの 10 分の 1 と仮定した。また、各ビームの要求通信速度は端末が一様分布していると仮定して算出した。

表 4-5 要求スループット

| Beam type | | | Maritime | Land | Disaster area |
|---------------------|--------------|----------|-----------|-----------|---------------|
| Number of beam | | | 30 | 9 | 4 |
| Number of terminal | | | 900 | 150 | 15000 |
| Required throughput | For terminal | Uplink | 1Mbit/s | 1Mbit/s | 0.15Mbit/s |
| | | Downlink | 10Mbit/s | 10Mbit/s | 1.5Mbit/s |
| | For beam | Uplink | 17Mbit/s | 30Mbit/s | 580Mbit/s |
| | | Downlink | 167Mbit/s | 300Mbit/s | 5.8Gbit/s |

図 4-27, 図 4-28 に平常時とトラヒック集中時における各ビームの周波数割り当て結果を示す. 図からわかるとおり, 従来法では各ビームに割り当て可能なユーザリンクの最大帯域幅が固定であり, かつフィーダリンクとユーザリンクの周波数割り当て比率も固定のため, 空き帯域が生じている. 一方, 提案法では, ユーザリンクとフィーダリンクの周波数比率を変更することでユーザリンクに多くの帯域を割り当てられる. また, 提案法では特定のビームへトラヒックが集中した際に, 周波数を集中割り当てすべきビームとの干渉が少ないゲートウェイを選択することで, フィーダリンクとユーザリンクを同一周波数で繰り返して割り当てることが可能となる.

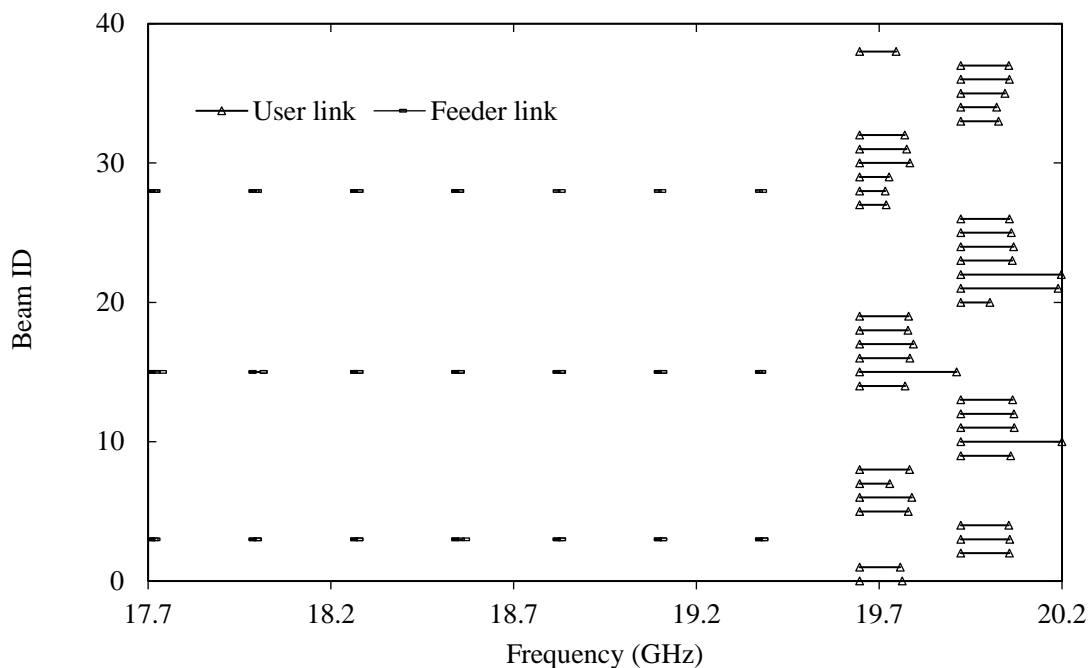


図 4-27 従来法における周波数割当

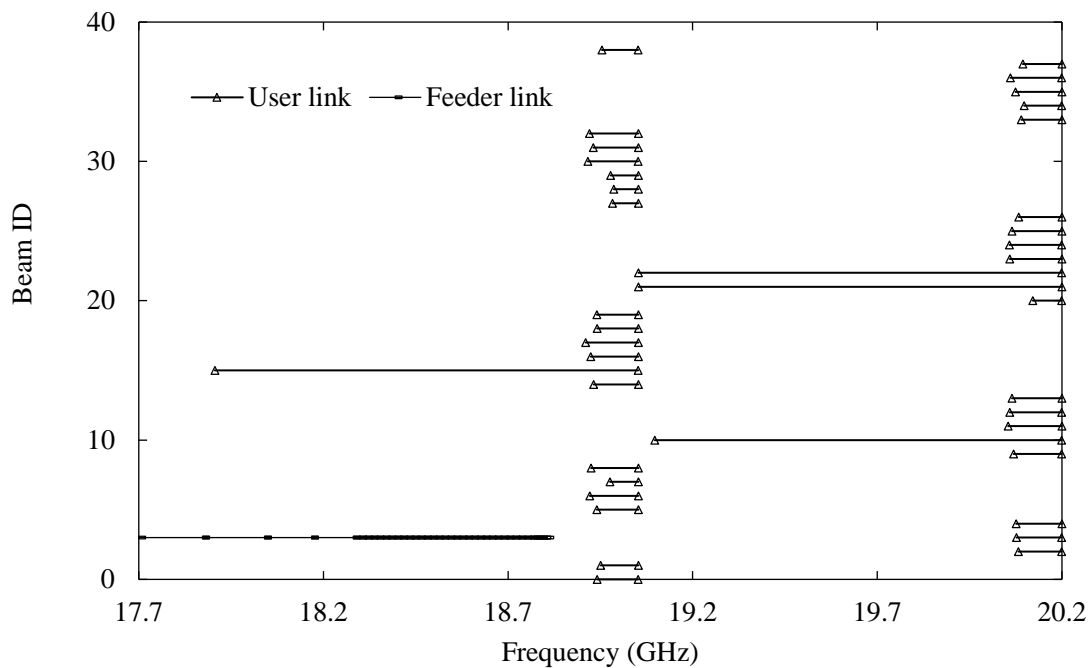


図 4-28 提案法における周波数割当

図 4-29 にシステムスループット特性を示す。提案法は、チャネライザによりユーザリンクとフィーダリンクの周波数を隙間なく割当てることができるため、従来法ではゲートウェイ 3 局を要するスループットを提案法では 2 局で実現できる。また、提案法ではゲートウェイを 3 局使用することにより、従来法と比較して 1.3 倍のスループット特性改善が見込まれる。図 4-30 に想定被災地域である 4 ビームの合計スループットを示す。図に示したように提案法は従来法と比較してトラヒックが集中するビームに対してフィーダリンクとユーザリンクの周波数を共用するように割り当てられるため、最大で約 13Gbit/s(従来法の約 6 倍)のスループットを実現できる。

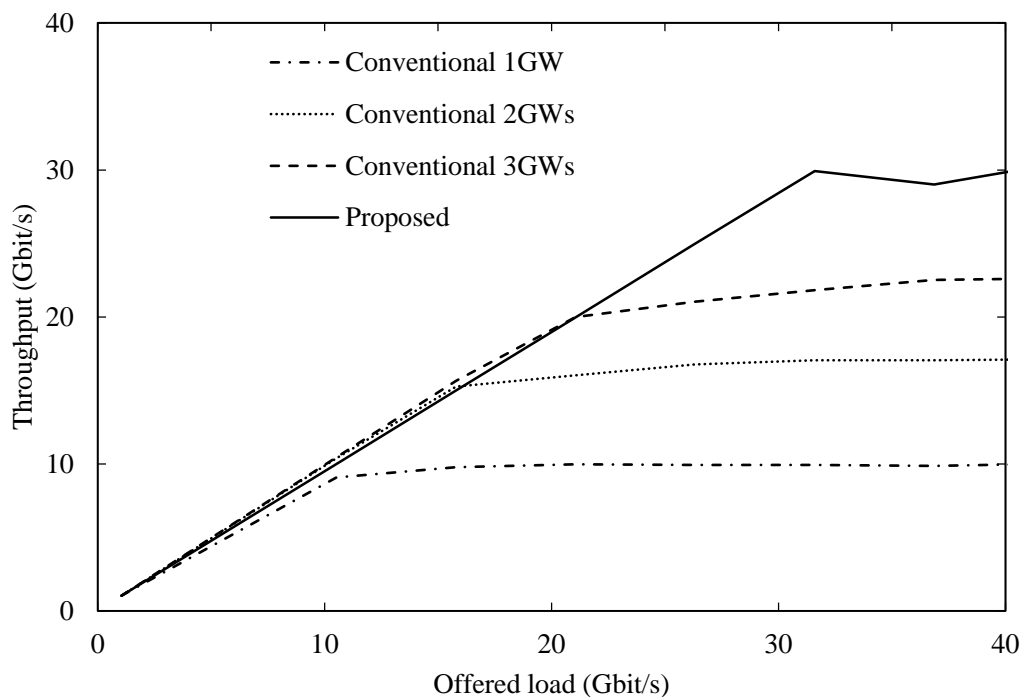


図 4-29 システムスループット特性

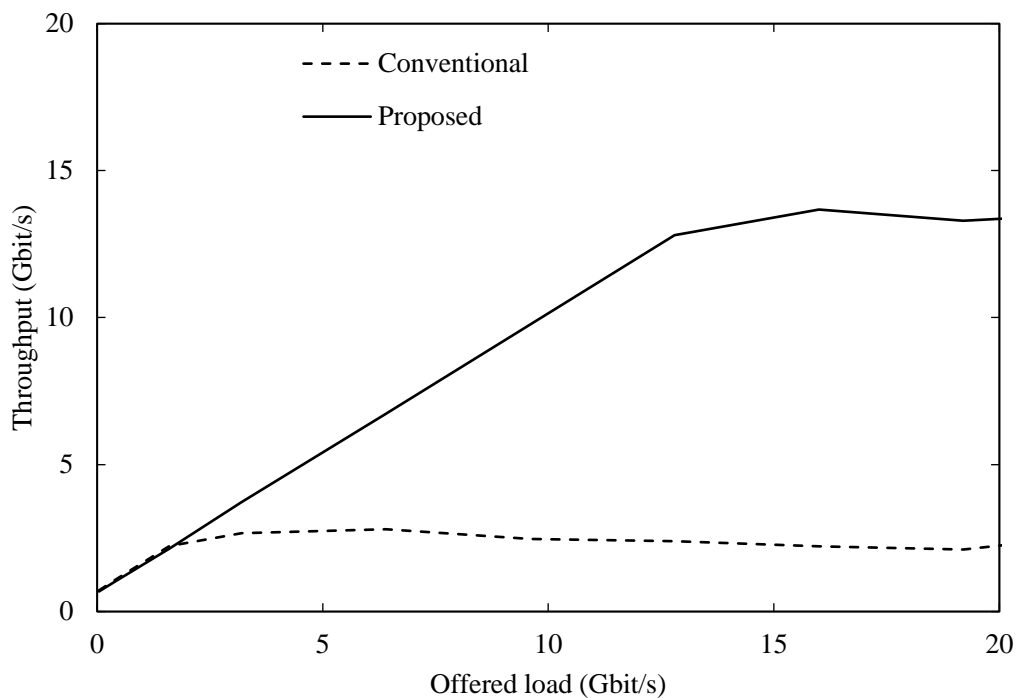


図 4-30 被災地をカバーするビームのスループット特性

図 4-31 にトラヒック集中時における各ビームのスループット特性を示す。図 4-28 に示したように、一部のビームへ周波数を集中的に割当てた場合においても、他のビームは表 4-5 で示した要求スループットを満たすことができおり、実際のサービスを想定した際に平常時のサービスに影響を与えない運用が期待できる

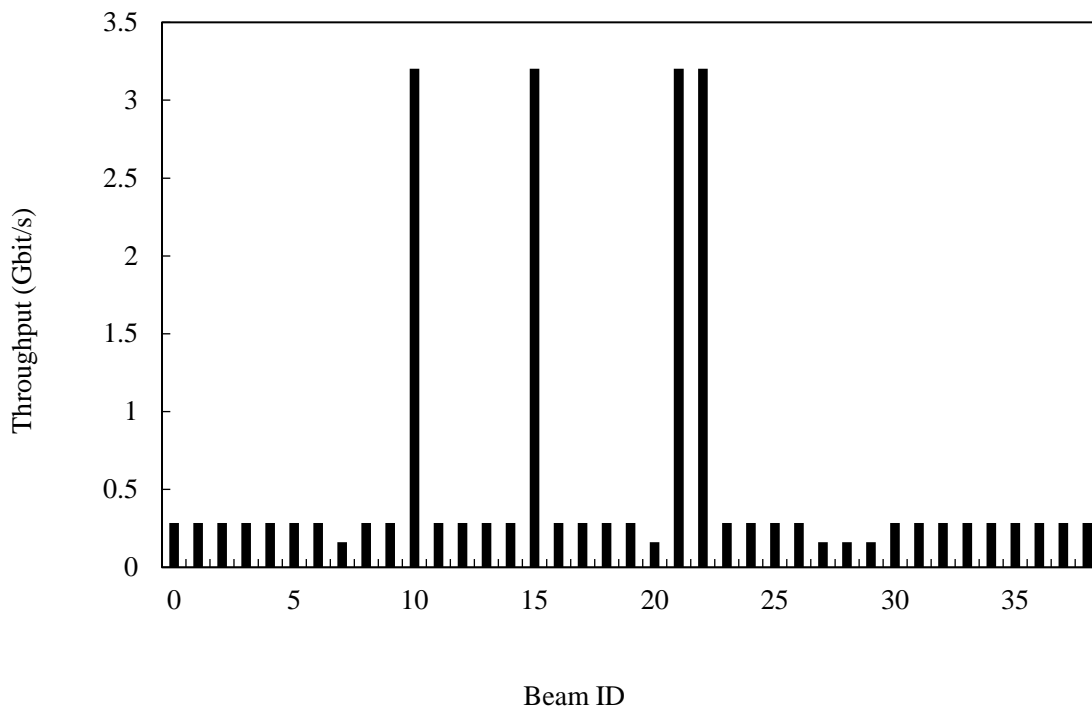


図 4-31 ビームスループット特性

4.5. 結言

本章では、観測衛星コンスタレーションを用いたリアルタイムモニタリングシステムの実現に向けた検討を行った。低軌道周回衛星は地上局上空を数分で通過することから観測データを一回の送信機会に全て送信できない場合が生じ、結果として次の地上局と通信を確立するまでの待ち時間が生じる問題があった。そこで、本章では、観測データを複数に分割し、異なるルートで複数の地上局へ同時に伝送する、マルチキャリア・マルチホップ伝送方式を提案した。また、提案法の有効性を計算機シミュレーションで評価し、最大 4 つの送信機で同時伝送することで約 99%(従来比 1.5 倍)の伝送確率を実現することを確認した。

また、広帯域化に伴い送信電力も増加することから、高速伝送のためには高出力化が必要となる。そこで、本章では、観測衛星データリンクの高速化を目的に、マルチキャリア伝送とシングルキャリア伝送を柔軟に切り替えるマルチキャリア・マルチモード変調器を提案し、試作器を用いて有効性を評価した。評価の結果、電力合成モード時の EVM は 4%未満、周波数多重モードと比較して 2.8dB の電力増加となり、所望の通信品質を満たせることを

確認した。

さらに、通信・観測需要が災害時等において局所的に集中する場合に対し、ハイブリッドネットワークで需要を吸収する手法として、ユーザリンクとフィーダリンクの接続と周波数割り当てを決定し、チャネライザ搭載衛星で中継することでスループット特性を改善する方式を提案した。そして、計算機シミュレーションによる評価の結果、特定の地域に通信需要が集中した場合に、固定周波数割り当ての HTS と比較してビームスループットを 6 倍改善できること示した。

第5章 結論

低軌道周回衛星を用いた地球観測は、自然災害時における早期の状況把握によるリスク低減に加え、インフラ維持管理や農林水産業の効率化など、観測データを活用した新たなソリューションを創出する可能性がある。地球観測データを上記活動で有効に活用するためには、高精度なセンサによる観測に加え、多数の衛星による観測頻度の向上が不可欠であり、これら観測データを迅速に地球局へ伝送する高速データリンクを確立することが必要となる。

低軌道周回衛星のデータリンクは、従来は X 帯によるデータ伝送が広く用いられているが、伝送速度の更なる向上に対しては帯域幅が制約となる。そこで、Ka 帯や Q 帯の利用により更なる伝送速度向上が期待されている。しかし、Ka 帯や Q 帯の利用に際しては、降雨減衰対策と、地上無線システムなどの一次利用者との周波数共用を解決する必要がある。また、大容量データを周回衛星の可視時間内に伝送し、リアルタイム性を確保する必要がある。

そこで、本研究では、衛星から地球局へのデータ伝送方法及び衛星間データ伝送方法をお互いの位置関係やデータ滞留量に応じて適応的に制御することで、低軌道周回衛星のネットワーク全体における通信品質と伝送容量の最適化を図る手法を確立した。

以下に、本論文の概要と寄与をまとめる。

2 章では、低軌道周回衛星を利用したシステムのうち、観測衛星に着目してシステムの特徴を整理した。さらに、従来の衛星-地球局間データ伝送方式について、大容量化に向けた課題として、降雨減衰対策、周波数共用の実現、低遅延衛星間伝送の実現という 3 つの課題を抽出した。また、左記に挙げた課題について、想定するシステムモデルを定義して、式展開した。

3 章では、降雨減衰対策と、周波数共用を両立する手法を示した。降雨減衰対策について、従来はサイトダイバーシチ技術が用いられているが、高周波化に伴い、アンテナパタンの影響で各地球局における SNR がアンバランスになるという問題があった。そこで、本章では、送信アンテナの指向方向を動的に制御するビーム制御方式を提案し、ダイバーシチゲイン

を最大化することを示した。さらに、ビーム制御方式を発展させ、最適な地球局を選択することで降雨減衰対策と周波数共用を両立した。

4章では、観測衛星コンスタレーションを用いたリアルタイムモニタリングシステムを実現する手法を示した。従来は周回衛星の可視時間内に、一つの地球局に対して観測データを送信していたため、可視時間内に全てのデータを送信しきれない場合に滞留遅延が生じる問題があった。そこで、観測データを複数に分割し、異なるルートで複数の地上局へ同時に伝送する、マルチキャリア・マルチホップ伝送方式を提案した。また、提案方式を実現するため、衛星に搭載するマルチキャリア・マルチモード変調器を試作し、有効性を評価した。さらに、通信・観測需要が災害時等において局所的に集中する場合に対し、ハイブリッドネットワークで需要を吸収する手法を示した。

最後に、5章で本論文の結論を示した。

上述したように、本研究では、多数の低軌道周回衛星が高精度なセンサで高頻度に観測を行う将来のリアルタイム観測システムの構築に向けて、観測データを迅速に地球局へ伝送する大容量データリンクを実現する手法を確立した。本研究により、自然災害リスクの低減や、観測データを活用した新たなソリューション創出に向けて一定の寄与を果たしたと考える。

謝辞

本論文は、筆者が三菱電機株式会社情報技術総合研究所で行った研究と、東北大学大学院情報科学研究科で行った研究をまとめたものです。本論文の執筆にあたり、多くの方々にご支援ご協力を賜りました。謹んで御礼申し上げます。

はじめに、東北大学大学院情報科学研究科 加藤 寧教授には、本研究をまとめる貴重な機会を与えていただいたのに加え、技術的なご指導ならびに研究に対するアプローチ手法を丁寧にご指導・叱咤激励いただきました。また、国際会議や論文投稿に際し、高い目標設定を与えていただき、刺激と責任感を感じながら研究を進めることができたことを心より感謝申し上げます。大町 真一郎教授、菅沼 拓夫教授には、本論文で研究成果をまとめるにあたり、様々な視点から貴重なアドバイスを賜りました。大変お世話になりました。西山 大樹准教授には、本研究の主題である衛星通信のみならず、広範な研究領域についてご指導いただいたことで、自身の知見を広げると共に新たな視点で研究を見つめることができました。また、加藤・西山研の皆さんにも本当にお世話になりました。社会人学生につき年齢は離れていましたが、研究室の一員として快く受け入れていただいたことで、限られた時間ではありましたが、新鮮な気持ちを味わうことができました。特に、金子 和真様とは年齢の差はあるものの博士課程同期として励ましあい、そして多大なるサポートをしていただいたことを感謝申し上げます。

三菱電機 開発本部 情報技術総合研究所 中川路 哲男所長、光電波・通信部門 宮下 裕章 統括、通信技術部 岡村 敦部長には、社会人課程での入学を許可いただき、多大なるご支援を賜りました。また、通信技術部 無線伝送・制御グループ 佐野 裕康グループマネージャ、及び無線信号処理グループ 元吉 克幸グループマネージャには、研究のアドバイスに加え、業務と研究との両立ができるようマネジメントしていただきました。無線信号処理グループ 早馬 道也様は、大学は異なるものの同時期に社会人博士課程に在籍すると共に、同一プロジェクトを担当していたことから、過負荷状態になりながらもお互いに切磋琢磨することができました。また、同無線信号処理グループの皆様にも、研究・業務両面で多大なサポートをいただきました。心より感謝申し上げます。

謝辞

三菱電機 電子システム事業本部, 鎌倉製作所, 通信機製作所, 開発本部 先端技術総合研究所にて業務上お世話になっている皆様におきましても, 様々な観点から広く情報共有・意見交換させていただいた内容が研究に活かされることが多々あり, 構想段階から実用までのストーリーを描きながら研究を進めることができました.

最後に, 陰ながら支えてくれた妻と, いつも笑顔で頑張る元気をくれた娘・息子, ありがとうございます.

本研究で得られた成果, 及び経験を踏まえて, 今後も社会に貢献する研究を進めていきたいと思えます.

著作物利用許諾

本論文で用いている図表等は出版済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。

- Shigenori Tani, Katsuyuki Motoyoshi, Hiroyasu Sano, Atsushi Okamura, Hiroki Nishiyama, and Nei Kato, "An Adaptive Beam Control Technique for Diversity Gain Maximization in LEO Satellite to Ground," IEEE International Conference on Communications (ICC 2016), May 2016.
- 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.
- 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 Disaster," IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing (TETC). DOI : 10.1109/TETC.2017.2688078.



RightsLink®

Home

Create Account

Help



Title: An adaptive beam control technique for diversity gain maximization in LEO satellite to ground transmissions
Conference Proceedings: 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)
Author: Shigenori Tani; Katsuyuki Motoyoshi; Hiroyasu Sano; Atsushi Okamura; Hiroki Nishiyama; Nei Kato
Publisher: IEEE
Date: 22-27 May 2016
 Copyright © 2016, 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 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 © 2017 [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



RightsLink®

Home

Create Account

Help



Title: An Adaptive Beam Control Technique for Q Band Satellite to Maximize Diversity Gain and Mitigate Interference to Terrestrial Networks
Author: SHIGENORI TANI; Katsuyuki Motoyoshi; Hiroyasu Sano; Atsushi Okamura; Hiroki Nishiyama; Nei Kato
Publication: IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing
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 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 © 2017 [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



RightsLink®

[Home](#) [Create Account](#) [Help](#)



Title: Flexibility-Enhanced HTS System for Disaster Management: Responding to Communication Demand Explosion in a Disaster
Author: SHIGENORI TANI
Publication: IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing
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 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 © 2017 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

参考文献

- [1] Interagency operation advisory group, "Recommendations on a strategy for space internetworking," Nov. 2008.
- [2] Y.Arikawa, H.Saruwatari, Y.Hatooka and S.Suzuki, "ALOS-2 launch and early orbit operation result," 2014 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp.3406-3409, July 2014.
- [3] DigitalGlobe, [online], Available <https://www.digitalglobe.com/>
- [4] D.Landon, R.Simons, E.Wintucky, J.Sun, J.Winn, A.Laraway, W.McIntire, J.Mets, and F.Smith, "Peak satellite-to-earth data rates derived from measurements of a 20 Gbps bread-board modem," 2011 IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2011), pp.1958-1963, Nov. 2011.
- [5] M.L'Abbate, P.Venditti, C.Svara, F.Bagaglini, and R.Roscigno, "From Mbps to Gbps: Evolution of payload data handling and transmission system for future earth observation missions," 2014 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), pp.576-581, May 2014.
- [6] E.Cianca, C.Stallo, M.Lucente, T.Rossi, C.Cornacchini, A.Vernucci, M.De Sanctis, and L.Bruca, "TRANSPONDERS: Effectiveness of propagation impairments mitigation techniques at Q/V band," 2008 IEEE GLOBECOM Workshops, pp.1-6, Nov.2008.
- [7] A.D.Panagopoulos, P.M.Arapoglou, J.D.Kanellopoulos, and P.G.Cottis, "Long-term rain attenuation probability and site diversity gain prediction formulas," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 53, no. 7, pp. 2307-2313, July, 2005.
- [8] M.Cossu, M.Bertinelli, C.Riva, G.Montorsi, M.D.Maggiora, M.Luise, "The impact of conditioned attenuation statistics on the performance of VCM techniques for Earth Observation satellites in LEO orbit," 2014 IEEE 8th European Conference on

- Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 3520-3523, Apr. 2014.
- [9] CCSDS 131.3-B-1, "CCSDS Space link protocols over ETSI DVB-S2 standard," Mar.2013.
- [10] ITU-R, "Radio regulation articles," 2012.
- [11] P. T. S. Tam, J. C. S. Lui, H. W. Chan, C. C. N. Sze and C. N. Sze, "An optimized routing scheme and a channel reservation strategy for a low Earth orbit satellite system," Gateway to 21st Century Communications Village. VTC 1999-Fall. IEEE VTS 50th Vehicular Technology Conf. (Cat. No.99CH36324), Amsterdam, 1999, pp. 2870-2874 vol.5.
- [12] V. V. Gounder, R. Prakash and H. Abu-Amara, "Routing in LEO-based satellite networks," 1999 IEEE Emerging Technologies Symp. Wireless Communications and Systems (IEEE Cat. No.99EX297), Richardson, TX, 1999, pp. 22.1-22.6.
- [13] C. Caini and R. Firrincieli, "Application of Contact Graph Routing to LEO satellite DTN communications," 2012 IEEE International Conf. on Communications (ICC), Ottawa, ON, 2012, pp. 3301-3305.
- [14] H. Tsunoda, K. Ohta, N. Kato and Y. Nemoto, "Supporting IP/LEO satellite networks by handover-independent IP mobility management," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 22, no. 2, pp. 300-307, Feb. 2004.
- [15] Y. Kawamoto, H. Nishiyama, N. Kato and N. Kadowaki, "A Traffic Distribution Technique to Minimize Packet Delivery Delay in Multilayered Satellite Networks," in IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 62, no. 7, pp. 3315-3324, Sept. 2013.
- [16] H. Nishiyama, Y. Tada, N. Kato, N. Yoshimura, M. Toyoshima and N. Kadowaki, "Toward Optimized Traffic Distribution for Efficient Network Capacity Utilization in Two-Layered Satellite Networks," in IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 62, no. 3, pp. 1303-1313, March 2013.
- [17] H. Nishiyama, D. Kudoh, N. Kato and N. Kadowaki, "Load Balancing and QoS Provisioning Based on Congestion Prediction for GEO/LEO Hybrid Satellite

- Networks," in Proc. of the IEEE, vol. 99, no. 11, pp. 1998-2007, Nov. 2011.
- [18] T. Lv, W. Liu, H. Huang and X. Jia, "Optimal Data Downloading by Using Inter-Satellite Offloading in LEO Satellite Networks," 2016 IEEE Global Communications Conf. (GLOBECOM), Washington, DC, 2016, pp. 1-6.
- [19] M. Wittig, "Internet access for everybody: The satellite solution," *Acta Astronautica*, vol.64, pp.222-229, Jan 2009.
- [20] ECC, "The use of the frequency bands 27.5-30.0 GHz and 17.3-20.2 GHz by satellite networks," ECC Report 152, Sept 2010.
- [21] J. Christensen, "ITU Regulations for Ka-band satellite networks," ITU Regional Seminar for RCC countries on Prospects for use of the Ka-band by satellite communication systems, Almaty, Kazakhstan, Sept 2012.
- [22] M. Angelone, N. Alagha and A. Ginesi, "Advanced physical layer techniques: Performance limits within future multi-spot Ka-band networks," 2012 IEEE First AESS European Conference on Satellite Telecommunications (ESTEL), pp.1-6, Rome, Italy, Oct 2012.
- [23] E. Feltrin, E. Weller, "New frontiers for the mobile satellite interactive services," 2010 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC), pp.155-161, Cagliari, Italy, Sept 2010.
- [24] D. Wilcoxson, "Advanced commercial satellite systems technology for protected communications," 2011 IEEE Military Communications Conference, pp.2280-2285, Baltimore, MD, USA, Nov 2011.
- [25] 内閣府, "宇宙産業ビジョン 2030,"
http://www8.cao.go.jp/space/public_comment/vision2030.pdf
- [26] Interagency operation advisory group, "Low earth orbit (LEO) 26GHz K-band study group final report," June. 2013.
- [27] L-3 Communications, "Space Communication Rates at Multi-Gbps (SCRAM),"

- NASA's Workshop on X-Ray Mission Architectural Concepts, Dec. 2011.
- [28] Simons et al., "Demonstration of multi-Gbps data rates at Ka-band using software-defined modem and broadband high power amplifier for space communications," IMS 2011, Jun. 2011.
- [29] L-3 Telemetry-West, "CTK-830 K-Band OQPSK Transmitter," http://www2.l-3com.com/tw/pdf/datasheets/ML601_Rev%20D.pdf
- [30] Wertz et al., "High Data Rate Transmission for Earth Observation Missions using Next Generation Downlink Subsystems and Modulators," 19th Ka and Broadband Communications, Navigation and Earth Observation Conference (KaConf 2013), Oct. 2013.
- [31] TESAT, "Communication Payloads, "
http://www.tesat.de/images/stories/PDF/CP_Broschure_2014.pdf
- [32] Space Micro, " μ Tx-300 Ka-Band Transmitter, "
<http://www.spacemicro.com/rf-and-microwave.html>
- [33] Northrop Grumman, "Multi-Gbps Space-to-Ground Communications,"
http://www.northropgrumman.com/Capabilities/AerospaceProducts/WidebandData/Documents/pageDocs/SpaceToGroundComm_Datasheet.pdf
- [34] A.Bosisio, C.Capsoni, A.Paraboni, G.E.Corazza, F.Vatalaro, and E.Vassallo, "Analysis and applications of short-distance site diversity techniques for 20/30 GHz communication links," 1995 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '95), pp.749-753, Nov. 1995.
- [35] ITU-R P.618-11, "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems," Sept. 2013.
- [36] A. Kyrgiazos, B.Evans and P.Thompson, "Gateway diversity scheme for a future broadband satellite system," 2012 6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC), pp.363-370, Sept.2012.

- [37] A.Kyrgiazos, B.G.Evans, and P.Thompson, "On the gateway diversity for high throughput broadband satellite systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 10, Oct. 2014.
- [38] Karin et.al, "Design and Performances of the Instruments for the Alphasat Aldo Paraboni IOT and Propagation Experiment in Graz," *20th Ka and Broadband Communications, Navigation and Earth Observation Conference (KaConf 2014)*, Oct. 2014.
- [39] T.Rossi, F.Maggio, M.D.Sanctis, M.Ruggieri, S.Falzini, and M.Tosti, "System analysis of smart gateways techniques applied to Q/V-band high throughput satellites," *2014 IEEE Aerospace Conference*, pp. 1-10, Mar. 2014.
- [40] J.Nessel, J.Morse, M.Zemba, C.Riva, L.Luini, "Performance of the NASA beacon receiver for the Alphasat Aldo Paraboni TDP5 propagation experiment," *2015 IEEE Aerospace Conference*, pp.1-8, Mar. 2015.
- [41] 総務省, "周波数割り当て計画,"
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/share/index.htm>
- [42] 総務省, "平成 24 年度電波の利用状況調査の評価結果及び意見募集の結果の公表,"
http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000098.html
- [43] ITU-R, F.1094-2, "Maximum allowable error performance and availability degradations to digital fixed wireless systems arising from radio interference from emissions and radiations from other sources," Sept. 2007.
- [44] ITU-R S.1655, "Interference mitigation techniques and frequency sharing in the bands 37.5-42.5 GHz and 47.2-50.2 GHz between geostationary-satellite fixed-satellite service networks and non-geostationary-satellite fixed-satellite service systems," Oct. 2003.
- [45] S.Maleki, S.Chatzinotas, B.Evans, K.Liolis, J.Grotz, A.V.Coralli, and N.Chuberre, "Cognitive spectrum utilization in Ka band multibeam satellite communications, " *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, issue 3, pp. 24-29, Mar. 2015.

- [46] S.K.Sharma, E.Lagunas, S.Maleki, S.Chatzinotas, J.Grotz, J.Krause, B.Ottersten, "Resource allocation for cognitive satellite communications in Ka-band (17.7-19.7 GHz)," 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW), pp. 1646-1651, June. 2015.
- [47] G.Marl, M. Bousquet, "Satellite communications systems third edition," WILEY, 1999.
- [48] ITU-R F.758-6, "System parameters and considerations in the development of criteria for sharing or compatibility between digital fixed wireless systems in the fixed service and systems in other services and other sources of interference," Sept. 2015.
- [49] H.Nishiyama, M.Ito, and N.Kato, "Relay-by-Smartphone: Realizing Multi-Hop Device-to-Device Communications," IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 4, pp. 56-65, Apr. 2014.
- [50] T.Ngo, H.Nishiyama, N.Kato, T.Sakano, and A.Takahara, "A Spectrum- and Energy-Efficient Scheme for Improving the Utilization of MDRU-based Disaster Resilient Networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 63, no. 5, pp. 2027-2037, Jun. 2014.
- [51] ETSI EN 302 307-2, "Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X)", Feb. 2015.
- [52] A. Fujimura, S. Tani, K. Motoyoshi, K. Nakamura, F. Ejima and F. Ishizu, "Novel DEMUX/MUX Method for Flexible Digital Channelizers using Half Band Filters," 31st AIAA International Communications Satellite System Conf. (ICSSC), Oct. 2013.
- [53] ITU-R P.618-11, "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems," Sept. 2013.
- [54] P. Ehret, A. Laurent and E. Bosch, "Broadband traveling wave tubes in Ka- and Ku-band," IEEE International Vacuum Electronics Conference, Monterey, CA, 2014, pp.

47-48.

- [55] Riverbed, “MODELER,”
<https://www.riverbed.com/sg/products/steelcentral/steelcentral-riverbed-modeler.html>
- [56] AGI, “System Tool Kit,” <https://www.agi.com/products/engineering-tools>
- [57] Python Software Foundation, <https://www.python.org/>
- [58] C. McLain, W. Hall, "Relative Performance of Mobile Networks in the Ku, Commercial Ka and Government Ka Bands, "2011 IEEE Military Communications Conference, pp.2081-2086, Baltimore, MD, USA, Nov 2011.
- [59] 中央防災会議, "南海トラフ巨大地震の被害想定について (第二次報告) ~ 施設等の被害 ~ 【定量的な被害量】 , "pp.21-27, March 2013.
- [60] A. Kwasinski, "Effects of notable natural disasters from 2005 to 2011 on telecommunications infrastructure: Lessons from on-site damage assessments," 2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), pp. 1-9, Oct. 2011.
- [61] S.Senda, "Current R&D Activities in Disaster Resilient ICT in Japan," presented at ITU-D Workshop on Emergency Telecommunications, Sept. 2016.
- [62] N. Suematsu, H. Oguma, S. Eguchi, S. Kameda, M. Sasanuma and K. Kuroda, "Multi-mode SDR VSAT against big disasters," 2013 European Microwave Conference, pp. 842-845, Oct. 2013.
- [63] T. Ngo, H. Nishiyama, N. Kato, T. Sakano and A. Takahara, "A Spectrum- and Energy-Efficient Scheme for Improving the Utilization of MDRU-Based Disaster Resilient Networks," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 63, no. 5, pp. 2027-2037, Jun 2014.
- [64] H. Nishiyama, M. Ito and N. Kato, "Relay-by-smartphone: realizing multihop device-to-device communications," in IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 4, pp. 56-65, April 2014.

- [65] M. Horiuchi, H. Nishiyama, N. Kato, F. Ono and R. Miura, "Throughput maximization for long-distance real-time data transmission over multiple UAVs," 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 1-6, May 2016.
- [66] N. Katayama et al., "Support activity using WINDS satellite link in the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake," 2011 The 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), pp. 1-5, Oct. 2011.
- [67] 末松憲治, 亀田卓, 高木直, 坪内和夫, 上野晋, 中根秀樹, 吉川憲昭, 小熊博, 内山浩, "災害時に有効な衛星通信ネットワークの研究開発(2) ～ マルチモード小型地球局の利用法の検討 ～," 信学技報, vol. 112, no. 440, SAT2012-49, pp. 11-16, Feb 2013.
- [68] M.J. Mallison, D. Robson, "Enabling Technologies for the Eurostar Geomobile Satellite", 19th AIAA International Communications Satellite System Conference (ICSSC), Toulouse, France, Apr. 2001.
- [69] 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, June 2014.
- [70] NTT ドコモ, "契約数月次データ,"
<https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/ir/finance/subscriber/>
- [71] 国土交通省, "航空輸送統計調査 速報(平成 25 年 11 月分)," Jan 2014.

研究業績

原著論文

- [1] 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 Disaster," IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing (TETC). DOI : 10.1109/TETC.2017.2688078.
- [2] 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.

国際学会(査読あり)

- [3] Shigenori Tani, Katsuyuki Motoyoshi, Hiroyasu Sano, Atsushi Okamura, Hiroki Nishiyama, and Nei Kato, "An Adaptive Beam Control Technique for Diversity Gain Maximization in LEO Satellite to Ground," IEEE International Conference on Communications (ICC 2016), May 2016.
- [4] Shogo Tsuzaki, Shigenori Tani, Katsuyuki Motoyoshi, Hiroyasu Sano, Atsushi Okamura, "Beam Layout Method for High Throughput Satellite to Maximize Coverage Area with Satisfying Permitted Interference Level," 22nd 23rd Ka and Broadband Communications Conference, Oct. 2016.
- [5] Yoshiyuki Tashima, Kazuya Inaoka, Masanobu Yajima, Nobuhiko Ando, Shigenori

- Tani, and Akinori Fujimura. "Performance Evaluation of a Ka-band Satellite Communication Subsystem Using Pre-distortion Techniques", 33rd AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibition, International Communications Satellite Systems Conferences (ICSSC), (AIAA 2015-4357)
- [6] Shigenori Tani, Katsuyuki Motoyoshi, Akinori Fujimura, Hiroyasu Sano, and Atsushi Okamura, "Flexible High Throughput Satellite System Architecture for Traffic Localization, " 20th Ka and Broadband Communications, Navigation and Earth Observation Conference, Oct. 2014.
- [7] Akinori Fujimura, Shigenori Tani, Katsuyuki Motoyoshi, Kazuhito Nakamura, Futaba Ejima, and Fumio Ishizu, "Novel DEMUX/MUX Method for Flexible Digital Channelizers using Half Band Filters," 31st AIAA International Communications Satellite System Conference (ICSSC), Oct. 2013.
- [8] Shigenori Tani, Michiya Hayama, Katsuyuki Motoyoshi, Atsushi Okamura, Hiroki Nishiyama and Nei Kato, "Multi-carrier Relaying for Successive Data Transfer in Earth Observation Satellite Constellations," IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2017), Dec. 2017. (Accepted)
- [9] Shigenori Tani, Michiya Hayama, Shogo Tsuzaki, Katsuyuki Motoyoshi, and Atsushi Okamura, " Multi-carrier and Multi-mode Transmitter for Earth Observation Satellite," AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2017), Oct. 2017. (Accepted)

国内会議発表(査読無し)

- [10] 谷重紀, 藤村明憲, 元吉克幸, 福井範行, 久保博嗣, "マルチキャリア伝送における干渉抑圧のための SINR 推定法に関する一検討," 電子情報通信学会 2012 年総合大会講演論文集, B-3-4, p.298, 2012.
- [11] 谷重紀, 藤村明憲, 元吉克幸, 平明德, 石津文雄, "デジタル衛星中継器の送信電力制御

- 法に関する一検討," 電子情報通信学会 2013 年総合大会講演論文集, B-3-26, p.335, 2013.
- [12] 谷重紀, 元吉克幸, 藤村明憲, 佐野裕康, 石津文雄, "衛星中継器の非線形歪みを考慮した送信電力制御法に関する一検討," 電子情報通信学会 2014 年総合大会講演論文集, B-3-17, p.316, 2014.
- [13] 谷重紀, 元吉克幸, 藤村明憲, 佐野裕康, 石津文雄, "高速衛星通信における通信需要の変化に対応したシステム構成に関する検討," 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.114 No.27, pp.57-62, 2014.
- [14] 谷重紀, 元吉克幸, 佐野裕康, 岡村敦, "高速衛星通信における通信需要の局所集中に対するシステム検討," 電子情報通信学会 2014 年ソサイエティ大会講演論文集, B-3-1, p.205, 2014.
- [15] 谷重紀, 元吉克幸, 佐野裕康, 岡村敦, "高速衛星通信におけるハイブリッド型中継器に関する一検討," 電子情報通信学会 2015 年総合大会講演論文集, B-3-37, p.289, 2015.
- [16] 谷重紀, 元吉克幸, 佐野裕康, 岡村敦, 秋田稔, 藤村明憲, "高速通信衛星におけるデジタルチャネライザによる周波数利用効率の向上," 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.115 No.180, pp.65-70, 2015.
- [17] 谷重紀, 津崎翔伍, 元吉克幸, 佐野裕康, 岡村敦, 西山大樹, 加藤寧, "低軌道周回衛星におけるサイトダイバーシチ適用時のビーム制御法," 電子情報通信学会 2015 年ソサイエティ大会講演論文集, B-3-7, p.192, 2015.
- [18] 谷重紀, 元吉克幸, 佐野裕康, 岡村敦, 西山大樹, 加藤寧, "低軌道衛星通信におけるビーム制御による地上システムへの与干渉低減," 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.116 No.41, pp.19-23, 2016.
- [19] 谷重紀, 津崎翔伍, 元吉克幸, 岡村敦, 西山大樹, 加藤寧, "低軌道周回衛星におけるマルチキャリアマルチホップ伝送," 電子情報通信学会 2017 年総合大会講演論文集, B-3-45, p.276, 2017.
- [20] 谷重紀, 早馬道也, 津崎翔伍, 元吉克幸, 岡村敦, "低軌道周回衛星におけるマルチキャリアマルチモード伝送方式," 電子情報通信学会 2017 年ソサイエティ大会講演論文集,

B-3-14, 2017.

表彰

[21] 電子情報通信学会 2014 年度衛星通信研究賞 “高速衛星通信における通信需要の変化
に対応したシステム構成に関する検討”