

革新的情報通信技術研究開発委託研究

Beyond 5G 機能実現型プログラム

基幹課題 研究計画書

課題 003

テラヘルツ帯を用いた Beyond 5G 超高速大容量通信
を実現する無線通信技術の研究開発



1. 研究開発課題

『テラヘルツ帯を用いた Beyond 5G 超高速大容量通信を実現する無線通信技術の研究開発』

2. 目的

令和 2 年 6 月に発行された総務省「Beyond 5G 推進戦略 -6G へのロードマップ-」では Beyond 5G/6G のあるべき姿として、まずは 5G の 3 つのネットワークスライスの高度化、即ち、さらなる「高速・大容量」・「低遅延」・「同時多数接続」を目指すとする。「高速・大容量」ではアクセス速度として 5G の 10 倍 (100Gbps) 以上といった目標が掲げられており、5G で本格的に利用が始まったミリ波より高い周波数帯であるテラヘルツ帯を用い、マイクロ波帯やミリ波帯では確保できない広い帯域幅を使って実現するというシナリオが掲げられている。アクセス速度の向上は、ユーザ端末における 8K 等の高品質動画ストリーミング伝送、大容量画像データのアップロードなどに寄与しユーザ体験を大幅に向上することに直結するため、様々なユースケースに対応したテラヘルツ帯無線システム技術の確立が求められている。さらに同推進戦略では、持続可能で新たな価値の創造に資する機能の付加として、拡張性が上げられている。この拡張性には地上通信システムの非地上ネットワーク (Non-Terrestrial Network: NTN) への拡張が含まれている。テラヘルツ帯を用いることで、従来の NTN より大容量でかつ低遅延なフィードリンクを確立することが、これまで以上の NTN の活用と共に求められている。

本委託研究では、テラヘルツ帯を用いた超高速・大容量無線通信の様々なユースケースのうち、近年様々な利用が進んでいるワイヤレスパーソナルネットワーク (WPAN)、ワイヤレスローカルネットワーク (WLAN) と非地上ネットワークの 3 種類のユースケースを想定したテラヘルツ帯送受信機技術とテラヘルツ帯送受信システム技術の研究開発し、より高い周波数のこれまでにない広い帯域の利用や空間多重を実現することで、様々なサービスにおける電波の有効利用に資することを目的とする。

WPAN については、3m 程度の近距離通信において、300GHz 帯 (例えば 220GHz から 330GHz) の電波を用いて、8K を超える高精細動画やホログラムを始めとした高度の映像データを個々のユーザに伝送 (100Gbps 程度) する通信システムの研究開発を実施する。これを実現するためには、300GHz 帯で従来の CMOS 以上の出力が得られる増幅器を用い、それらをアンテナと集積しアレイ化することで、電波の指向性を高める必要がある。この様な通信モジュールを実現するためには、不要な方向へのエネルギー放射 (サイドローブ) を抑制するとともに、所望のビーム振れ角 (ビーム角度) を制御可能なアンテナ設計が求められる。また、素子間を再配線する際のアライメント精度が配線抵抗や損失に及ぼす影響を解析し、それらを抑制するための素子レイアウトや配線材料を検討する必要がある。さらに出力が高い増幅器では発熱が深刻化するため、集積に用いるモールド基板の反りなど、配線材料への影響も考慮した放熱構造が求められる。増幅器に用いる半導体デバイスの出力は高周波化に伴い低下するが、ガリウムナイトライド (GaN) 及びインジウムリン (InP) 等の化合物半導体は、100GHz 超の周波数帯での高出力化が期待されている材料である。ここでは、化合物半導体を用いた高出力増幅器とアンテナに加え、移相器やミキサも含めた多素子を集積しアレイ化することで、300GHz 帯で動作する増幅器一体型アレイアンテナを実現し、ビーム指向を確認することを目的とする。

WLANについては、スタジアム等への来場者に対する8K品質等の超精細動画配信サービスやインターネット接続サービスを前提に研究開発を行う。このようなシステムにおいては、下り回線のトラフィックが大きくなる非対称通信であることから300GHz帯を用いた半二重システム適用し、伝搬路の特性を鑑みてMulti-Input Multi-Output (MIMO) 技術を用いることで、H.265により圧縮した8K動画を最大100人程度に同時配信することが可能な正味の伝送速度20Gbpsの実現を目的とする。このシステムを実現するため、MIMO機能を有する高利得アンテナ、フロントエンド部、ベースバンド部をそれぞれ実現し統合実証を行う。

NTNプラットフォームは、いわゆる空飛び基地局として地上・海上の船舶・低空のドローン等の移動体向けブロードバンド通信サービス、機内の乗客や乗員向けのブロードバンド通信サービス、搭載した8K等の超高解像度画像センサーによる地上や海上の観測、NTNプラットフォームの運行管理情報の伝送、災害時の臨時回線等、様々なサービス利用が考えられている。これらのサービスでは、移動体通信システムのデータレートの向上やセンサー解像度の向上などから、より高速なデータレートの実現が求められている。地上局と成層圏(11~16km)に滞在するNTNプラットフォーム間のフィードリンクについて、テラヘルツ帯無線を適用しその高度化を図ることを目的とする。少雨(曇り、(1.25mm/h)環境においても正味の伝送速度10Gbpsを実現するため100GHz帯(例えば90GHzから110GHz)を用いる周波数分割複信(FDD: Frequency Division Duplex)方式の通信方式を確立する。このシステムを実現するため、追尾機能を有するリフレクトアレイアンテナ、フロントエンド部、ベースバンド部をそれぞれ実現し統合実証を行う。

なお、本課題は、「Beyond 5G 研究開発促進事業 研究開発方針」(令和3年1月28日総務省国際戦略局)における「3. 研究開発項目」の「① Beyond 5G 機能実現型プログラム」(p.3)のうち、ア) 開発目標(数値目標等)を具体的かつ明確に定めてハイレベルな研究開発成果の創出を目標とし、研究計画書を作成し、実施者を公募する課題(基幹課題)として実施する。

3. 内容

本委託研究では、以下の3つの研究開発項目に対し、研究開発を推進するものとする。

・研究開発項目1 テラヘルツ帯増幅器一体型アレイアンテナ技術の研究開発

本項目では、3m程度の近距離通信において、300GHz帯(例えば220GHzから330GHz)の電波を用いて、8Kを超える高精細動画やホログラムを始めとした高度の映像データを個々のユーザに伝送(100Gbps程度)する通信システムを実現する。そのために必要となるキーデバイスとして増幅器とアンテナを3次元で異種集積化したテラヘルツ帯で動作する増幅器一体型アレイアンテナ技術の構築を中心に、以下の3つの研究開発を推進する。

a) ビーム制御機能を有する増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュールの研究開発

ここでは、増幅器とアンテナを3次元で異種集積化することで、300GHz帯で動作する増幅器一体型アレイアンテナを実現する。現在、平面内において、サイドローブを抑制可能なアンテナ間隔で、移相器やミキサも含めた全素子を集積することは非常に困難で、これまでに作製された例はない。それに対し、立体的な3次元積層が可能となれば、チップ面積の奥行方向への拡張が可能と

なり、集積の自由度が高まる。ここでは、b)で開発したアンテナと増幅器を、放熱を考慮した構造で同一の基板に集積した後、それらを立体積層することで、3次元の増幅器一体型アレイアンテナモジュールを実現する。これにより、300GHz帯で動作するフェーズドアレイアンテナを作製し、ビーム指向を確認する。なお、マルチユーザーに対する無線通信が確保できるよう、増幅器には高出力な化合物半導体を用い、実効的な電波強度（EIRP：Equivalent Isotropic Radiated Power）を40dBm程度確保し、角度 $\pm 30^\circ$ のビーム方向制御を実現する。

b) 300GHz帯アレイアンテナの研究開発

300GHz帯において、サイドローブの抑制とビーム角度制御の両立を可能とするアレイアンテナ設計を行う。アンテナ利得は開口面積の縮小に伴い低下するため、300GHz帯アレイにおける狭ピッチに対応させるには、アンテナ1素子の利得を維持した小型化が課題である。一方、狭い領域に増幅器やミキサなどを含めた複数の素子を集積化するため、所望のビーム性能を満たす範囲でアンテナピッチを可能な限り広げることも求められる。

c) 増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュールを用いた伝送実験

a)で開発したビーム制御機能（ $\pm 30^\circ$ ）を有する増幅器一体型アレイアンテナモジュールを用いて伝送実験を行い、伝送速度100Gbps、通信距離3mを実証し、テラヘルツ波を用いたビーム制御技術が300GHz帯における通信エリアの拡大に有効であることを示す。

・研究開発項目2 テラヘルツ帯を用いた限定エリア内無線システムの研究開発

本項目では、限定エリア内等における動画配信サービスやインターネット接続サービスにおいてH.265により圧縮した8K動画を最大100人程度に同時配信することが可能な正味の伝送速度20Gbpsの実現を目的とする無線システム技術の構築を目的に、以下の4つの研究開発を推進する。

a) MIMO機能を有する高利得アンテナ制御技術の研究開発

300GHz帯を用いMIMO方式を適用するための小型で広帯域な多素子パッチアンテナを開発する。

b) 300GHz帯フロントエンド部の研究開発

フロントエンド部の研究開発では、大容量かつ小型軽量の無線モジュールの実現のために広帯域な化合物半導体デバイスとアナログフロントエンド部の開発を行う。

c) ベースバンド部の研究開発

限定エリア内通信システムは複数局への通信を目的として、半二重通信により非対称リンクのトラフィックに対応する。項目a)と連携して伝送距離70メートル程度、正味の伝送速度20Gbps級、ユーザ数100人級の無線通信を実現する。

d) 統合伝送実験

限定エリア内模擬環境を準備し、伝送実証を行い研究開発したシステムを検証する。

・研究開発項目3 テラヘルツ帯を用いた地上～NTNプラットフォーム間フィーダーリンクシステムの研究開発

本項目では、周波数分割複信（Frequency Division Duplex：FDD）として地上局とNTNプラ

ットホーム間を 1 対 1 で回線を接続する。少雨（曇り）環境においても正味の伝送速度 10Gbps の実現を目的とする無線システム技術の構築を目的に、以下の4つの研究開発を推進する。

a) 高利得リフレクトアレイアンテナの研究開発

高度 11～16km に滞空する NTN プラットホームに搭載可能な小型で追尾機構を備えた 100GHz 帯の高利得なリフレクトアレイアンテナを開発する。

b) 100GHz 帯フロントエンド部の研究開発

フロントエンド部の研究開発では、大容量かつ小型軽量の無線モジュールの実現のために広帯域な化合物半導体デバイスとアナログフロントエンド部の開発を行う。

c) ベースバンド部の研究開発

無線方式は周波数分割複信（Frequency Division Duplex：FDD）として地上局と NTN プラットホーム間を 1 対 1 で回線を接続する。正味の伝送速度は、晴天時では 20Gbps、小雨（曇り（1.25mm/h））では 10Gbps 級を実現する。ベースバンド部のリンクが切断時した場合の、再接続するまでの復帰時間、回線品質劣化時の改善方法についても明らかにする。

d) 統合伝送実験

成層圏環境でのシステム実証試験と長距離伝送の耐環境特性実証を行い研究開発したシステムを検証する。

4. アウトプット目標・アウトカム目標

・研究開発項目1 テラヘルツ帯増幅器一体型アレイアンテナ技術の研究開発

2024 年度末におけるアウトプット目標（最終目標）

a) ビーム制御機能を有する増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュールの研究開発

- ・集積構造：3次元
- ・EIRP：40dBm
- ・ビーム角度：±30°

b) 300GHz 帯アレイアンテナの研究開発

- ・アンテナ利得：15dBi

c) 増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュールを用いた伝送実験によりシステムの有効性を検証

- ・伝送速度：100Gbps
- ・通信距離：3m

2022 年度末におけるアウトプット目標

a) ビーム制御機能を有する増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュールの研究開発

- ・集積構造：2次元
- ・ビーム角度：±10°

b) 300GHz 帯アレイアンテナの研究開発

- アンテナ利得：9 dBi
- c) 増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュールを用いた伝送実験
 - 2023-2024 年度の伝送実験に向け、試験系の構築など準備を進める。

アウトカム目標

2025 年 IEEE 802.15 標準化提案

2027 年 標準化完了およびアクセスポイントの商品化を実現

(ただし、ステージゲート評価後も研究を継続した場合)

• 研究開発項目2 テラヘルツ帯を用いた限定エリア内無線システムの研究開発

2024 年度末におけるアウトプット目標 (最終目標)

a) MIMO 機能を有する高利得アンテナ制御技術の研究開発

- 周波数利用効率 (MIMO) : 10bps 級/Hz
- 通信距離距離 : 70m 級

b) 300GHz 帯フロントエンド部の研究開発

- EIRP : 20dBm 級
- チャネル帯域幅 : 2.0GHz 級

c) ベースバンド部の研究開発

- 通信方式 : 半二重通信
- 正味の伝送速度 : 20Gbps
 - ※正味の伝送速度 : エラーフリー条件でオーバーヘッド無し of データ速度
- ユーザ数 : 100 人級
 - ※フル解像度 8K を H.265 で圧縮した場合を想定

d) 統合伝送実験

- 想定ユースケースに合わせた実環境もしくは模擬環境における伝送実証

2022 年度末におけるアウトプット目標

a) MIMO 機能を有する高利得アンテナ制御技術の研究開発

- 周波数利用効率 (MIMO) : 2.5bps 級/Hz
- 通信距離距離 : 10m 級

b) 300GHz 帯フロントエンド部の研究開発

- EIRP : 10dBm 級
- チャネル帯域幅 : 2.0GHz 級

c) ベースバンド部の研究開発

- 通信方式 : 半二重通信
- 正味の伝送速度 : 4Gbps 級
 - ※正味の伝送速度 : エラーフリー条件でオーバーヘッド無し of データ速度
- ユーザ数 : 20 人級

※フル解像度8KをH.265で圧縮した場合を想定

d) 統合伝送実験

- 実験室環境における伝送実証

アウトカム目標

2025年 IEEE 802.11 標準化提案

2026年 テラヘルツ帯アナログフロントエンド部・ベースバンド部のLSI化への推進

2027年 標準化完了および想定ユースケースのデモンストレーション

2028年 想定ユースケースのテラヘルツ帯を用いた限定エリア内無線 LAN 通信装置の実用化

(ただし、ステージゲート評価後も研究を継続した場合)

• **研究開発項目3** テラヘルツ帯を用いた地上～NTN プラットホーム間フィーダーリンクシステムの研究開発

2024年度末におけるアウトプット目標 (最終目標)

a) 高利得リフレクトアレイアンテナの研究開発

- 通信距離：11～16km
- アンテナ構造：開口径 60cm 級以下のカセグレン方式 (2 軸駆動角度制御+リフレクトアレイ)
- 追尾性能：30 度以下 (追尾幅)、0.2 度以下 (角度追尾精度)、0.1 度/秒以上 (角度追尾速度)
- ビーム幅：0.5 度以下

b) 100GHz 帯フロントエンド部の研究開発

- 周波数帯：100GHz 帯
- IF 帯域幅：2GHz 級 ※送受それぞれ、※周波数チャンネル毎

c) ベースバンド部の研究開発

- 通信方式：FDD
- 正味の伝送速度：10Gbps (少雨 (曇り)：1.25mm/h)
※正味の伝送速度：エラーフリー条件でオーバーヘッド無し of データ速度

d) 統合伝送実験

- 成層圏環境での試験と長距離伝送の耐環境特性実証

2022年度末におけるアウトプット目標

a) 高利得リフレクトアレイアンテナの研究開発

- 通信距離：400m 級
- アンテナ構造：開口径 40cm 級以下のカセグレン方式 (2 軸駆動角度制御)
- 追尾性能：15 度以下 (追尾幅)、0.4 度以下 (角度追尾精度)、0.05 度/秒以上 (角度

追尾速度)

- ビーム幅：0.5 度以下

b) 100GHz 帯フロントエンド部の研究開発

- 周波数帯：100GHz 帯
- IF 帯域幅：2GHz 級（送受それぞれ）

c) ベースバンド部の研究開発

- 通信方式：FDD
- 正味の伝送速度：2.0Gbps（晴天）

※正味の伝送速度：エラーフリー条件でオーバーヘッド無しでのデータ速度

d) 統合伝送実験

- 成層圏を模擬した環境での電波暗室実証試験

アウトカム目標

2025 年 ITU-R MSS アーキテクチャの研究へ展開

2026 年 テラヘルツ帯無線機、ベースバンド通信装置の実用検証

2027 年 標準化完了

2028 年 NTN テラヘルツ帯通信ネットワークの商品化の実現

（ただし、ステージゲート評価後も研究を継続した場合）

5. 採択件数、研究開発期間及び研究開発予算等

採択件数：研究開発項目 1、研究開発項目 2、研究開発項目 3 ごとに 1 件。

研究開発期間：契約締結日から 2024 年度（2022 年度に実施するステージゲート評価を踏まえ、継続の必要性等が認められた場合には、2024 年度まで継続予定。ステージゲート評価や Beyond 5G 研究開発促進事業の後年度予算の状況等により、研究開発期間を変更する場合がある。認められなかった場合 2022 年度末で終了。）。

研究開発予算：各年度、研究開発項目 1、研究開発項目 2、及び研究開発項目 3 を合わせて総額 900 百万円（税込）を上限とする（提案の予算額の調整を行った上で採択する提案を決定する場合がある。ステージゲート評価や Beyond 5G 研究開発促進事業の後年度予算の状況等により、各年度の研究開発予算を変更する場合がある。）。

研究開発体制：単独の提案も可能であるが、産学官連携等による複数の実施主体からなる体制とすることを推奨する。その際、社会実装を考慮した体制とすること。

6. 提案に当たっての留意点

- 研究開発項目 1、研究開発項目 2 及び研究開発項目 3 のいずれか又は複数の研究開発項目に提案することができる。複数の研究開発項目に応募する場合、提案書は一つにまとめること。

- 提案書には、ステージゲート評価後 2024 年度まで実施することを仮定して、2024 年度までの計画を記載すること。
- 具体的目標に関しては、2022 年度後半のステージゲート評価を受ける際の間目標と、当該評価で継続が認められた場合の 2024 年度の最終目標について、定量的に提案書に記載すること。
- 本研究開発の遂行過程で得られるデータについては、広くオープンにするのが望ましいことから、公開できると想定するデータがある場合には、その公開や利活用促進に関する計画（例：公開するデータの種類、公開先、公開方法等）を提案書に記載すること。なお、本項目は採択評価時の評価項目とする。
- 本委託研究で研究開発する技術について、具体的に B5G の実現にあたりどのような分野のどのような知的財産の取得が期待できるのか、何件程度の特許出願を目指すのか、また、知的財産の取得とともに標準化活動の推進も重要であることから、どのような分野のどのような標準の策定が期待できるのか、どのような標準化活動を推進するのか、知財戦略と標準化戦略をどのように一体的に推進しようとしているかについて提案書に記載すること。なお、本項目は採択評価時の評価項目とする。
- 外国の民間企業、大学、アライアンス、コンソーシアム等との連携体制が構築できている又は計画している場合には、具体的な連携の方法について提案書に記載すること。なお、本項目は採択評価時の評価項目とする。
- 実施体制については、本研究開発の目的に則した実施体制を構築することとし、それぞれの役割を明記すること。
- 研究開発の実施に当たっては、関連する要素技術間の調整、成果の取りまとめ方等、研究開発全体の方針について幅広い観点から助言をいただくとともに、実際の研究開発の進め方について適宜指導をいただくため、学識経験者、有識者等を含んだ研究開発運営委員会等を開催する等、外部の学識経験者、有識者等を参画させること。
- 本研究開発成果の社会実装に向けて、到達目標の項目に記載したマイルストーンを意識しつつ、具体的な時期（目標）、体制、方策等を記載すること。その際、持続的に自走するための計画等についても記載すること。
- 研究開発成果の情報発信を積極的に行うこと。

7. 運営管理

- 複数の機関が共同で受託する場合には、代表提案者が受託者間の連携等の運営管理を行い、受託者間調整会議を定期的を開催すること。
- 国立研究開発法人情報通信研究機構（以下「機構」という。）と受託者の連携を図るため、代表提案者は、機構の指示に基づき定期的に連絡調整会議を開催すること。
- 社会情勢や研究環境の変化等、必要に応じて、機構が研究計画書を変更する場合があるので、留意すること。

8. 評価

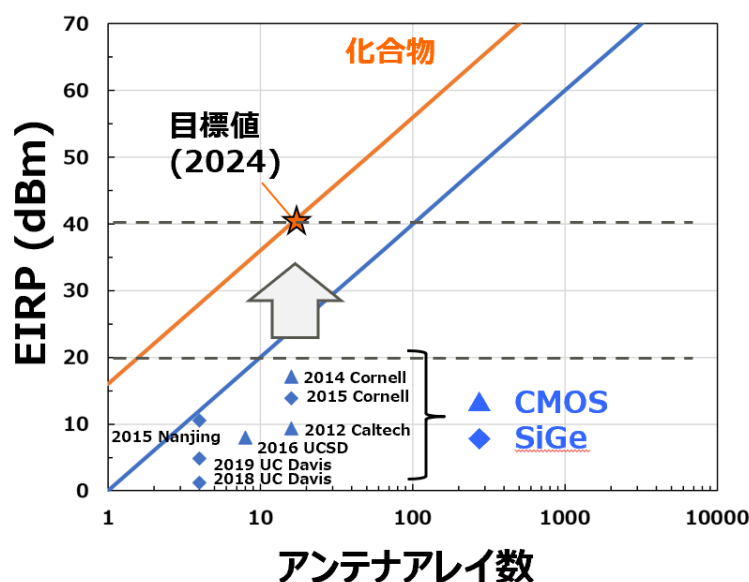
- 機構は、研究開発終了時に終了評価を実施する。2022 年度後半において、評価委員会による評価（ステージゲート評価）を実施し、継続の必要性等が認められた場合には、2024 年度まで委託研究を継続し、2024 年度末に委託研究を終了する。評価の結果、継続性の必要性が認められなかった場合は 2022 年度末に終了とする。
- 機構は、本委託研究終了後に成果展開等状況調査を行い、追跡評価を行う場合がある。
- 機構は、上記以外にも本委託研究の進捗状況等を踏まえて、臨時にヒアリングを実施することがある。

9. 成果の社会実装等に向けた取組み

- B5G の実現を支える技術として、知的財産戦略及び標準化戦略、さらには製品化と海外市場への展開戦略を記載するとともに、知財獲得に向けて必要な取組みを視野に入れること。
- 実用化、事業化、社会実装に向けた出口戦略を明確とすること（委託研究後の事業化等の内容を明確にする）。
- 上記の出口戦略を実現するため、場合によっては本委託研究で得られた成果のオープン化（例えば、成果発表やそれに留まらずコミュニティ先導のための国際ワークショップや国内特別セッション主催、展示、標準化、オープンソース化等）も行う等、成果の社会実装等に向けて必要な取組みを行うこと。

参考

研究開発項目 1 関連



※これまでの CMOS や SiGe を用いた 300GHz アレイアンテナの EIRP 報告例は 20dBm 以下。また、化合物を用いたアレイ化の報告は無い。

※出力:13dBmの化合物半導体パワーアンプを用いて4×4素子の集積化が実現すると、EIRPは40dBmに到達する見込み(24年目標値)

研究開発項目 2 関連

	光ファイバーLAN	ローカル 5G	本項目
距離	70m	1200m	70m
周波数帯		Ka 帯 (28GHz 帯)	テラヘルツ帯 (300GHz 帯)
通信容量	100Gbps (4 チャンネル)	5Gbps 最大 20Gbps 100MHz 4ch	20Gbps
配線等の重量	100g/m		Ka 帯より小型化可能
具体例	光 Ether (QSFP 4ch)	各社	

研究開発項目 3 関連

	静止衛星 GEO HTS	非静止小型衛星 LEO	次世代 HTS	HAPS	本項目
高度	36000km	500-2000km	36000km	15-32km	11-16km (航空機、HAPS)
周波数帯	C 帯/Ku 帯/Ka 帯	Ku 帯/Ka 帯/Q・V 帯	Ka 帯/光	Ka 帯/Q・V 帯	テラヘルツ帯 (100G 帯)
通信容量	4G レベル	数十 Mbps (Ka 帯)	10Gbps (光) 1Gbps/ビーム (Ka 帯)	数十 Mbps	20Gbps/4 周波数 CH 10Gbps/2 周波数 CH
気象条件			晴天時のみ (光)		20Gbps (晴れ) 10Gbps (小雨、曇り) 強雨の条件でも通信維持
具体例	スカパーJSAT の HTS	Starlink	ETS9(2025 打 上げ予定	総務省「電 波資源拡 大」	