

## 電波資源拡大のための研究開発

## 平成 30 年度から新たに実施予定の研究開発

個別研究開発課題	基本 計画書 (案)
5G の普及・展開のための基盤技術に関する研究開発	別添 1
IoT/5G 時代の様々な電波環境に対応した最適通信方式選択技術の研究開発	別添 2
テラヘルツセンシングシステム基盤技術の研究開発	別添 3
周波数有効利用のための IoT ワイヤレス高効率広域ネットワークスキャン技術の研究開発	別添 4
IoT 機器増大に対応した有無線最適制御型電波有効利用基盤技術の研究開発のうち「光ファイバ無線技術によるモバイルフロントホールの大容量・高効率化技術」	別添 5

## <基本計画書(案)>

### 5Gの普及・展開のための基盤技術に関する研究開発

#### 1. 目的

我が国の移動通信トラヒックは、LTE等のモバイルブロードバンドサービスの加入数の増加や高精細映像配信サービス等の普及により、年間約1.3倍と爆発的な増加が続いている。今後もモバイル環境での4K/8K視聴など高精細動画の伝送需要の増大や、モバイルとクラウド・コンピューティングサービスとの連携拡大等により、移動通信トラヒックの更なる増加が見込まれている。

現在、超高速化・大容量化等を実現する第5世代移動通信システム(5G)の2020年の実現に向け、超高速通信実現に必要な超広帯域を確保できる高SHF帯(主要国で検討されている28GHz帯)等を活用し、無線技術を中心とした研究開発や具体的なアプリケーションを想定した実証試験が進められている。しかし、2023年頃の5Gを活用したサービスの本格的な普及・展開には、高SHF帯(6GHz以上)やEHF帯(30GHz以上)を活用した基地局を街灯、ビルの壁面等への柔軟な設置を実現する必要があり、基地局の低消費電力化・小型軽量化を実現する基地局構成技術の確立が求められている。また、高SHF帯、EHF帯は電波の特性から直進性が強く、減衰が大きいいため、特定の方向に指向性を持たせるビームフォーミング技術を用いることが期待されている。ビームフォーミングの適用により、カバレッジの拡大、複数ユーザとの同時通信によるセル容量の拡大等を実現できるものの、高速移動する端末に適切に追従する機能が不可欠である。

本研究開発では、「高SHF帯」及び「EHF帯」の高周波数帯(以下、「ミリ波帯」という。)において、基地局の低消費電力化・小型化を実現する基地局構成技術や高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術を確立し、周波数の効率的な利用を促進するとともに、高い周波数帯への移行を加速させる。

#### 2. 政策的位置付け

・未来投資戦略2017(平成29年6月9日閣議決定)

「第2 具体的政策 II Society 5.0に向けた横割課題 A. 価値の源泉の創出 1. データ利活用基盤の構築 (2) 新たに講ずべき具体的施策 vii) 第5世代移動通信システム(5G)等の情報通信基盤の活用」において、「自動走行等の社会実装に寄与する情報通信基盤整備のため、超高速、多数接続、超低遅延が可能となる第5世代移動通信システム(5G)の2020年までのサービス開始に向けた取組等を推進する。本年夏に、周波数確保に向けた基本戦略を取りまとめ、技術的条件や周波数確保の検討を加速する。あわせて、本年度以降、交通などの分野で具体的な利活用を想定した総合的な実証試験を、地方都市を含めた試験場所において実施するとともに、国際標準化活動への参画や電波利用環境の整備を積極的に推進す

る。」旨、記載されている。

・新しい経済政策パッケージ（平成 29 年 12 月 8 日閣議決定）

「第 3 章 生産性革命 3. Society 5.0 の社会実装と破壊的イノベーションによる生産性革命 （4） Society 5.0 のインフラ整備 ①通信インフラの強化 ii）第 5 世代移動通信システム（5G）の実現・活用 - 超高速・大容量・多数接続・超低遅延の通信を可能とする 5G について、2020 年を目途に、世界に先駆けて実現し、自動走行などの具体的な用途を開拓しつつ、地方への普及展開を一気に進める。」旨、記載されている。

### 3. 目標

本研究開発は、2023 年頃の 5G を活用したサービスの本格的な普及・展開に向けて、街灯、ビルの壁面等への柔軟な基地局展開を行うため、基地局の低消費電力化・小型化を実現するミリ波帯基地局構成技術や、高速移動に対して追従可能なビーム制御や高速かつ安定したセル間のビーム切り替えを実現する高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術を確立するものである。これにより高周波アンプでの帯域内消費電力を削減し、基地局の小型化に貢献するとともに、高速移動体で高速伝送を実現することで、周波数の効率的な利用や高い周波数の利用を加速させることを目標とする。

#### ア 基地局の低消費電力化・小型化を実現するミリ波帯基地局構成技術

28GHz 帯等の高 SHF 帯において、1GHz 幅程度の広帯域全体について効率 20%以上の信号増幅を可能とし、実用化済みの移動体基地局用高周波アンプと比較して、消費電力の 1/3 の削減、高周波アンプサイズ 1/3 化による基地局サイズ 1/3 化を実現する。

また、70GHz 帯等の EHF 帯において、従来の基地局用高周波アンプと比べて熱抵抗を 30%削減し、1km 程度のカバレッジに必要となる出力を可能とする EHF 帯基地局用結晶・デバイス技術を実現する。

#### イ 高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術

28GHz、39GHz 帯等のミリ波帯を用いる時速 90km 以上の高速移動体において、例えば、将来の数百 Mbps を超える映像コンテンツを 10 以上同時に安定して通信できる 4Gbps の高速データ通信の提供を可能とするために、周波数帯域幅 1GHz 程度における高能率な変調符号化方式及び複数ストリームの空間多重を通信に適用できる技術を確立し、端末あたり 4 ビット/秒/Hz の周波数利用効率(同時収容端末数を 2 以上とする)を実現する。

### 4. 研究開発内容

#### (1) 概要

ミリ波を活用したスモールセル基地局の電柱や街灯といった場所への柔軟な展開を行うため、基地局の低消費電力化・高効率化・小型化を実現するミリ波帯基地局構成技術や、高速移動体に対して追従可能なビーム制御や高速かつ安定したセル間のビーム切り替えを実現する高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術の研究開発を行う。

#### ア 基地局の低消費電力化・小型化を実現するミリ波帯基地局構成技術

街灯やビルの壁面等への柔軟な基地局配置を可能とする 5G 基地局用高周波アンプに適用する半導体デバイス技術の開発。

#### イ 高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術

鉄道や自動車等の移動体に搭載あるいは持ち込んだ 5G 移動局が時速 90km 以上の高速移動時においてもミリ波帯基地局との間において安定した高速データ通信を実現するための 5G 無線アクセス（又は無線エントランス）技術の確立。

### (2) 技術課題および到達目標

#### 技術課題

#### ア 基地局の低消費電力化・小型化を実現するミリ波帯基地局構成技術

##### (a) 高 SHF 帯 5G 基地局の普及・展開に向けたデバイス・回路技術の研究開発

アンテナ素子数について、4 素子程度を用いる 4G と比べ、5G では 256 素子以上の利用が検討されている。このため、既存の高 SHF 帯基地局用の高周波アンプを 5G 基地局に用いた場合、実装方法にもよるが、例えば、アンプサイズは約 6 倍となり、消費電力の増大による冷却部の肥大化も含め、基地局サイズは既存の 4G 基地局の 3 倍以上になる見込みである。このため、2023 年頃の 5G を活用したサービスの本格的な普及・展開に向けて、既に街灯や壁面へ設置されている 4G 用の基地局よりも低消費電力化・小型軽量化を実現する基地局構成技術が求められている。

高周波アンプの小型・高効率化を実現する手法として、トランジスタと高周波回路を半導体チップ上に集積化する技術（MMIC: Microwave Monolithic IC）が用いられているが、GaAs デバイスでは、高 SHF 帯基地局用途として十分な出力が得られないことが従前の課題となっている。また、SiC 基板上の GaN デバイスでは、元来 MMIC を適用することが困難であることに加え、消費電力が高く、ITU において IMT-2020（いわゆる 5G）の要求条件として規定されている最大帯域幅 1GHz といった広帯域全体について、高効率化が難しいという課題がある。

本研究開発では、高周波回路を集積化するアンプモジュール技術を確立することで、単一の高周波アンプによって上記課題を解決し、高 SHF 帯における 1GHz 幅程度の広帯域全体を 20%以上の効率で信号増幅する基地局構成技術を開発する。

(b) EHF 帯 5G 基地局の普及・展開に向けた基板・結晶技術の研究開発

EHF 帯については、2016 年 7 月、米国 FCC は 64-71GHz 帯を 5G 用に開放することを発表した。また、ITU においても、2019 年の WRC-19 に向けて、86GHz 以下の周波数帯について、IMT 用への特定に向けた検討が進められている。これら 70GHz 帯等の EHF 帯 5G のユースケースとしては、現時点ではラストワンマイルの通信容量確保、将来的にはマイクロセルとしての運用等が検討されており、4G と同等のカバレッジを可能とする高出力な EHF 帯 5G 基地局の実現が期待されている。

高 SHF 帯基地局用に集積化・小型化したアンプをより高い周波数で動作させようとした場合、高 SHF 帯に向けて設計されたデバイス性能では、効率・性能が劣化する。このため、十分な出力を持つ EHF 帯基地局の実現には、数 W/mm の高出力動作を可能にする電流密度・耐圧をもちうる半導体材料において、高速動作に必要な微細ゲート構造を可能にする結晶構造成長技術を確立する必要がある。さらに、動作周波数の増加に伴い、動作波長の縮小による集積回路面積の縮小、さらに回路の効率低下による発熱により、デバイスの熱抵抗に対する要求が厳しくなる。そこで、数 W/mm の高出力動作を可能にする半導体材料系において高品位の結晶性を保ちつつ熱抵抗低減技術を確立する必要がある。

本研究開発では、基地局アンプ用デバイスの高速・高出力化を可能とする半導体結晶構造を、絶縁特性や放熱特性に優れた基板上へ直接成長により作製する技術を確立する。さらに、半導体結晶を剥離により薄化し所望の基板上に転写する基盤技術を確立することにより、従来のデバイスと比べて熱抵抗を低減し、十分なカバレッジ確保に向け高出力動作が可能な EHF 帯基地局用デバイス技術を開発する。

## イ 高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術

5G によって、国民生活に不可欠な移動手段である鉄道の乗車時等においても容易に利用できる高速データ通信を提供可能とすることで、地域格差の無い高度情報化社会の実現に寄与することが求められている。米国、韓国等の主要国においても、高速移動時に 28GHz 帯、39GHz 帯等を用いて、Gbps オーダーの高速データ通信の実現を目標に検討が進められている。都市部から郊外地域に至るまで広範囲に鉄道等の交通網が発達した我が国においても、これまでの 5G 実証試験を踏まえて、高速移動時で数百 Mbps を超える映像コンテンツを 10 以上同時に安定して通信できる 4Gbps の高速データ通信の実現などが求められている。

高い周波数帯での活用が検討されているビームフォーミング技術を用いた場合、端末の方向に正確にビームを向けることが必要となるが、特に、高速移動体への追従性の確保やセル間の円滑なビーム切り替えを実現することが課題となっている。また、セル間の連携を強化するために光張出し構成によりセル間協調制御機能を適用しようとする、光伝送帯域幅の占有が増大することが課題となっている。このため、ITU において IMT-2020 (いわゆる 5G) の要求条件として規

定されている周波数利用効率<sup>\*</sup>についても、高速移動時には条件が緩和されているが、高速移動中も含めて 5G 利用を拡大するためには、上記課題の解決を通してさらなる周波数利用効率の向上が求められている。

本研究開発では、高速移動体に対応したビーム追従や、セル間の円滑なビーム切り替えを実現するための、ビーム制御技術やセル間協調制御技術の開発を行う。

※Report ITU-R M. 2410 において規定される要求条件

最高周波数利用効率 30 ビット/秒/Hz (下り) 15 ビット/秒/Hz (上り)

移動性能 1.12 ビット/秒/Hz (30km/h) 0.8 ビット/秒/Hz (120km/h)

## 到達目標

### ア 基地局の低消費電力化・小型化を実現するミリ波帯基地局構成技術

(a) 高 SHF 帯 5G 基地局の普及・展開に向けたデバイス・回路技術の研究開発  
・ 6 インチ等の大口径基板上に高密度に微細ゲート加工トランジスタを作製するための基地局用デバイス製造技術

・ 高周波回路を集積化するためのアンプモジュール技術

上記の技術を確立し、28GHz 帯等の高 SHF 帯において、1GHz 幅程度の広帯域全体について効率 20%以上の信号増幅を可能とし、実用化済みの移動体基地局用高周波アンプと比べて消費電力の 1/3 の削減、高周波アンプサイズ 1/3 化による基地局サイズ 1/3 化を実現する。

(b) EHF 帯 5G 基地局の普及・展開に向けた基板・結晶技術の研究開発

・ 50nm 以下のゲート長においても性能劣化しない高電子移動度トランジスタを作製するための構造設計・結晶成長技術

・ 数 W/mm の高出力動作を可能にする半導体材料系においても熱抵抗の削減を可能にする高品位結晶技術

上記の技術を確立し、70GHz 帯等の EHF 帯において、従来の基地局用高周波アンプと比べて熱抵抗を 30%削減し、1km 程度のカバレッジに必要となる出力を可能とする EHF 帯基地局用結晶・デバイス技術を実現する。

### イ 高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術

・ ベースバンド集約装置において効率的にビーム探索を行い、高速移動体への追従性能を向上するビーム制御技術

・ ベースバンド集約装置に接続する複数の超多素子アンテナ間を高速に切り替えるセル間ビーム切替え技術

・ 複数のベースバンド集約装置が接続されているセル間協調制御装置において、安定したセル移行（ハンドオーバ）を実現するセル間協調制御技術

・ セル間協調制御装置の機能の一部をベースバンド集約装置へ移すことで光伝送帯域幅を低減しつつ、追従性能をほぼ同等水準で維持できる機能分離技術

上記の技術を確立し組み合わせることで、28GHz、39GHz 帯等のミリ波帯を用いる時速90km以上の高速移動体において、周波数帯域幅1GHz程度を前提に端末あたり4ビット/秒/Hzの周波数利用効率(同時に基地局とデータ伝送を行う端末数を2以上とする)を実現する。

なお、上記の目標を達成するに当たっての年度毎の目標については、以下の例を想定しているが、提案する研究計画に合わせて適宜設定して良いこととする。

<平成30年度>

ア 基地局の低消費電力化・小型化を実現するミリ波帯基地局構成技術

- ・ 6インチ等の大口径基板上における高SHF帯5G基地局用の微細ゲート加工デバイスの基本設計、試作による性能評価
- ・ EHF帯5G基地局用デバイスの基板・結晶成長技術の検討、ゲート微細化を含むプロセス技術の検討、構造設計、試作による性能評価
- ・ 数W/mmの高出力動作を可能にする半導体材料系における、薄化高品位結晶基板の剥離手法の検討、試作による性能評価
- ・ 薄化高品位結晶基板と熱伝導性に優れた基板との接合技術の検討、シミュレーション評価

イ 高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術

- ・ 超多素子アンテナ及びベースバンド集約装置、移動局装置の開発、屋内実験による基本性能評価
- ・ 高速移動に追従可能なビーム制御アルゴリズム及びセル間ビーム切り替えアルゴリズムの検討、シミュレーション評価
- ・ セル間協調制御アルゴリズムの基本検討、シミュレーション評価

<平成31年度>

ア 基地局の低消費電力化・小型化を実現するミリ波帯基地局構成技術

- ・ 6インチ等の大口径基板上での高SHF帯5G基地局用の微細ゲート加工デバイスの改良、MMICアンプモジュールの基本設計
- ・ EHF帯5G基地局用デバイスの基板・結晶成長技術及びプロセス技術の改良、試作による性能評価
- ・ 薄化高品位結晶基板と熱伝導性に優れた基板を用いた転写法による高品位結晶技術の検討、試作による性能評価

イ 高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術

- ・ 超多素子アンテナ及び移動局装置の改良
- ・ ビーム制御アルゴリズム及びセル間ビーム切り替えアルゴリズムのベースバンド集約装置への実装

- ・ 屋外実験による基本性能評価
- ・ セル間協調制御アルゴリズムの検討、シミュレーション評価、同アルゴリズムを実装したセル間協調制御装置の開発

<平成 32 年度>

ア 基地局の低消費電力化・小型化を実現するミリ波帯基地局構成技術

- ・ 高 SHF 帯 5G 基地局用 MMIC アンプモジュールの試作による性能評価
- ・ 結晶成長技術及びプロセス技術を用いた EHF 帯 5G 基地局用デバイスの試作、性能評価
- ・ 高品位結晶技術の改良、性能評価

イ 高速移動体向けミリ波帯基地局連携技術

- ・ 超多素子アンテナ、ベースバンド集約装置、セル間協調制御装置、移動局装置を用いた屋外実験による総合評価
- ・ 屋外実験に基づいた各種アルゴリズムの最適化・改良

5. 実施期間

平成 30 年度から 32 年度までの最大 3 年間

6. その他

(1) 成果の普及展開に向けた取組等

①国際標準化等への取組

国際競争力の強化を実現するためには、本研究開発の成果を研究期間中及び終了後、速やかに関連する国際標準化規格・機関・団体へ提案を実施することが重要である。このため、研究開発の進捗に合わせて、国際標準への提案活動を行うものとする。なお、提案を想定する国際標準規格・機関・団体及び具体的な標準化活動の計画を策定した上で、提案書に記載すること。

②実用化への取組

研究開発期間終了後も引き続き取り組む予定の「本研究開発で確立した技術の普及啓発活動」及び平成 37 年度までの実用化・製品展開等を実現するために必要な取組を図ることとし、その活動計画・実施方策については、提案書に必ず具体的に記載すること。

(2) 提案および研究開発に当たっての留意点

提案に当たっては、想定される 5G の利活用シーンを考慮しつつ、基本計画書に記されている目標に対する達成度を評価することが可能な具体的な評価項目を設定し、各評価項目に対して可能な限り数値目標を定めること。また、従来の技術との差異を明確にした上で、技術課題及び目標達成に向けた研究方

法、実施計画及び年度目標について具体的かつ実効性のある提案を行うこと。

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頂くと共に、実際の研究開発の進め方について適宜指導を頂くため、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。

なお、本研究開発において実用的な成果を導出するための共同研究体制又は研究協力体制（海外の研究開発プロジェクト等との連携を想定する場合も含む）について、研究計画書の中にできるだけ具体的に記載すること。

## ＜基本計画書(案)＞

IoT/5G時代の様々な電波環境に対応した最適通信方式選択技術の研究開発

### 1. 目的

スマートフォン、無線LAN等の急速な普及に伴う通信量の増大、スマートメータやセンサネットワーク等IoT機器の増加等に加え、電波雑音を発する電子機器の数も増加しており、周波数帯のひっ迫が一層懸念されている。電波雑音や電波干渉は無線機器等の密度や通信トラフィック量に応じて変わるため、場所・時間等によってダイナミックに変化する。その際、例えば、受信感度の高い無線システム等は雑音や干渉の影響を大きく受けて通信品質が劣化する可能性がある。そのような状況の中で周波数を有効に利用していくためには、無線通信ネットワークが使用する周波数帯における様々な電波雑音や電波干渉の特性を正確に把握した上で無線通信を適切に制御・選択する必要がある。

そのため、本研究開発では、IoTで利用される周波数帯の電波雑音や無線機器間の電波干渉を調査・測定し、同周波数帯における電波環境の実態を分析するとともに、電波伝搬モデルを構築する。これに加えて、動的に変化する様々な電波環境や通信状況を勘案しながら、多数同時接続を考慮した場合における最適な通信方式や伝送パラメータ、通信経路等を選択して制御する技術を確立し、IoTで利用される周波数帯における面的な周波数利用効率の向上を図り、周波数のひっ迫状況を緩和する。

### 2. 政策的位置付け

IoTや5Gは、以下の各政府戦略等において重要な位置付けとなっている。

【未来投資戦略2017（平成29年6月9日閣議決定）】

（2）新たに講ずべき具体的施策

iii）技術開発の推進と協調領域の深化・拡大等

③ 第5世代移動通信システム（5G）の実現・活用

- ・自動走行等を社会に取り入れることに寄与する情報通信基盤整備のため、超高速、多数接続、超低遅延が可能となる第5世代移動通信システム（5G）の2020年までのサービス開始に向けた取組等を推進する。

【科学技術イノベーション総合戦略2017（平成29年6月2日閣議決定）】

第2章 未来の産業創造と社会変革に向けた新たな価値創出の取組

（2）新たな経済社会としての「Society 5.0」を実現するプラットフォーム

② プラットフォームを支える基盤技術の強化

i) サイバー空間関連技術

- ネットワーク技術：膨大なIoT機器が接続して多様なデータが伝送されて

も安定して運用できるネットワーク構築が重要である。

【世界最先端IT国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画について（平成29年5月30日 閣議決定）】

（8）研究開発【基本法第16条関係】

① 分野横断的な施策のうち重点的に講ずべき施策

・ データ活用基盤技術の強化として、次世代人工知能技術、5G等の研究開発の推進

<5G>

- これまでの研究開発の促進、国際連携の強化、周波数確保に向けた基本戦略等の検討を実施。
- 今後、研究開発や社会実装を念頭に置いた総合的な実証試験の促進を通じ、平成32年に5Gを実現。

【電波政策2020懇談会（平成28年7月 総務省）】

（3） モバイルサービスの将来展望と具体的方策

① 次世代モバイルサービス実現プロジェクトの推進

（イ） ワイヤレスIoT・プロジェクト

a) 目標

現在の数百倍以上のモノ（センサー等）がつながるIoTの世界を実現

b) 推進モデル

・ 大多数同時接続モデル

- 小型・安価・低消費電力の無線端末を実現し、それが極めて多数密集している場合でも、確実にワイヤレス通信を実行

### 3. 目標

本研究開発は、IoTで利用される周波数帯の電波雑音特性、無線機器間の電波干渉特性、電波伝搬モデル等を明らかにした上で、それらに基づく無線通信制御・選択技術確立し、利用シーンや用途に応じて想定されるIoTアプリケーションで要求される通信品質を確保するという条件の下、既存ネットワークと比べて同時接続数を2倍以上に向上させ、周波数利用効率2倍以上を実現するとともに、研究開発成果の国際標準化を目指す。

### 4. 研究開発内容

（1）概要

IoTで利用される周波数帯のひっ迫の緩和に向けて、これらの周波数帯における電波雑音や電波伝搬モデルを正しく把握した上で、その時の周辺の電波環境や通信状況に基づいて、複数の無線通信ネットワークの中から最適な方式を選択・制御する技術の研究開発を実施する。

## (2) 技術課題および到達目標

### 技術課題

#### ア 電波環境の測定・分析及び電波伝搬モデル構築技術の研究開発

今後予想される無線機器の増加等による電波干渉の増加に伴い、受信感度の高い無線システム等は電波雑音や電波干渉の影響を大きく受ける可能性がある。また、電波雑音に関する国際標準が定められているが、1970年代の実測結果に基づくものであり、雑音源となる電子機器の種類や密度が増加している近年の電波雑音の特性を正確に表していない。今後は膨大な数の無線機器が使用され、他周波数帯からの電波干渉に対してこれまでのような離隔距離の確保では対処できず、干渉量に合わせた対処が必要となるが、実態を正確に把握できていない。さらに、その対処のためには、各周波数帯において種々の環境に応じた高精度な電波伝搬モデルが必要となるが、十分なモデルが揃っていない。

IoTで利用される周波数帯の電波雑音や他周波数帯も含めた無線機器間の電波干渉等の電波環境の測定・分析技術、及び電波伝搬特性に基づく利用状況に適した電波伝搬モデル構築技術の研究開発を行う必要がある。

#### イ 電波環境モニタリング技術の研究開発

電波環境として直接的に測定できるのは、自システムからの電波干渉に加え、他システムからの電波干渉や電子機器等に起因して生じる環境雑音を合わせたトータル電力である。電波環境の変化に応じてネットワーク全体で効率を向上させるためには、制御できない他システムからの電波干渉や環境雑音の振る舞いを正確に把握した上で、トータルの電力量を調整すべく自システムの電波干渉量を推定・制御する必要があるが、これまではそれらを正確に把握・推定できていない。

環境の変化や周辺の無線通信システムの利用状況等に応じて時々刻々と変化する電波雑音や電波干渉を測定し、管理下にある制御可能な無線装置からの電波干渉量、並びに管理外の無線装置からの電波干渉量及び環境雑音の二つに分離して必要な粒度で把握・推定する技術の研究開発を行う必要がある。

#### ウ 広域無線ネットワーク最適化技術の研究開発

膨大な数の多様な無線機器が様々な無線周波数帯で通信を行う場合、伝送品質に影響を与える電波干渉等の状況が時々刻々と複雑に変化するが、主に屋外において無線機器の密度が高く、これまでのように無線システム間で離隔距離を確保して干渉回避を行うことが困難であり、電波干渉等の影響により無線ネットワーク全体の効率が低下する問題が発生する。これを解決するためには、前述のように、制御できない他システムからの電波干渉や環境雑音を正確に把握した上で、トータルの電力量を調整すべく自システムの電波干渉量を推定・制御する必要がある。

そこで、環境雑音及び他システムからの電波干渉の情報に基づき、使用する無線システムを適切に選択して通信経路や送信電力、伝送レート、無線チャネル等を動的に制御することで適応的に自システムの電波干渉制御を行い、トータル干渉電力等を勘案して無線ネットワーク全体の効率向上を可能とする技術の研究開発を行う。

## 到達目標

### ア 電波環境の測定・分析及び電波伝搬モデル構築技術の研究開発

IoT デバイス等の受信感度が高く電波雑音や電波干渉の影響を受けやすい無線ネットワークで課題となる電波雑音や電波干渉等の電波環境の測定・分析技術、及び電波伝搬特性に基づく利用状況に適した電波伝搬モデル構築技術。

- ・ IoT で利用される周波数帯（920MHz 帯、2.4GHz 帯、5GHz 帯）における電波雑音や無線通信システム間の干渉を、課題ウで確立する技術の利用シーン（例えば、遠隔カメラを活用した建設現場の安全確認やセンサによる港湾での荷物積み卸し状況管理など）に則した屋外の実フィールドで測定・調査し、同周波数帯における電波環境の実態を把握する。
- ・ 屋外の種々のフィールドにおける電波伝搬特性を取得し、各フィールドにおける電波伝搬モデルを構築する。
- ・ これらの電波雑音特性や電波伝搬モデルについて、ITU-R 等における国際標準化活動を実施し、国際標準への反映を行う。

### イ 電波環境モニタリング技術の研究開発

環境の変化や周辺無線通信システムの利用状況等に応じて時々刻々と変化する電波雑音や電波干渉を必要な粒度で適時かつ効率的に把握・推定する技術。

- ・ IoT で利用される複数の周波数帯における電波環境（環境雑音、同一帯域内の無線システムからの電波干渉、他帯域の無線システムからの電波干渉など）について、広域無線ネットワークの最適化に必要な粒度と頻度での把握を実現する。
- ・ 電波環境の測定・分析及び電波伝搬モデル構築技術で構築した電波伝搬モデル、及び管理下の無線システムの送信出力等の情報に基づき、課題ウにおける目標を実現するために必要な精度で、種々の場所における管理下の無線システムからの電波干渉量の推定を実現する。
- ・ 上記で把握した電波環境の情報、及び推定した管理下の無線システムからの電波干渉量の情報に基づき、課題ウにおける目標を実現するために必要な精度で、電波雑音（管理外の無線システムからの電波干渉＋環境雑音）量の推定を実現する。

### ウ 広域無線ネットワーク最適化技術の研究開発

様々な電波環境や通信状況を勘案しながら、多数同時接続を考慮した場合における最適な無線通信ネットワークを選択・制御する技術。

- ・ 課題アの電波環境の測定・分析及び電波伝搬モデル構築技術で把握した電波環境の実態と構築した電波伝搬モデルに基づき、場所や時刻等によって変動する電波雑音や電波干渉に柔軟に対応可能な、複数の無線システムを活用する無線ネットワーク設計を実現する。
- ・ 課題イの電波環境モニタリング技術により把握・推定した時々刻々と変化する広域エリア内の種々の地点における電波雑音や電波干渉の状況に基づき、使用する無線システムを選択するとともに、送信電力や伝送レート、無線チャネル、通信経路等を動的に制御することで適応的に電波干渉制御を行い、無線通信ネットワーク全体での周波数有効利用を実現する。
- ・ 課題ア及びイの技術の検討と並行して広域無線ネットワークの基本設計等を行った上で、実環境を模擬したフィールド実験によって本研究開発による技術の有効性を検証するとともに、具体的な利用シーン（例えば、遠隔カメラを活用した建設現場の安全確認やセンサによる港湾での荷物積み卸し状況管理など）を想定した適切な制御を実現すること。

なお、上記の目標を達成するに当たっての年度毎の目標については、以下の例を想定している。

#### <平成 30 年度>

- ア 電波環境の測定・分析及び電波伝搬モデル構築技術の研究開発
  - ・ 電波環境の基本測定及び基本分析・評価
  - ・ 伝搬特性の基本測定及び伝搬モデルの一次検討
- イ 電波環境モニタリング技術の研究開発
  - ・ 電波環境モニタリング装置の基本設計
  - ・ 電波環境モニタリング装置の一次試作
- ウ 広域無線ネットワーク最適化技術の研究開発
  - ・ 広域無線ネットワークの基本設計及び制御装置の一次試作
  - ・ 最適通信方式選択対応無線装置の基本設計及び一次試作

#### <平成 31 年度>

- ア 電波環境の測定・分析及び電波伝搬モデル構築技術の研究開発
  - ・ 電波環境の追加測定及び詳細分析・評価
  - ・ 伝搬特性の追加測定及び伝搬モデルの二次検討
- イ 電波環境モニタリング技術の研究開発
  - ・ 電波環境モニタリング装置の詳細設計
  - ・ 電波環境モニタリング装置の二次試作及び評価実験
- ウ 広域無線ネットワーク最適化技術の研究開発

- ・ 広域無線ネットワークの詳細設計及び制御装置の二次試作
- ・ 最適通信方式選択対応無線装置の詳細設計及び二次試作

<平成 32 年度>

ア 電波環境の測定・分析及び電波伝搬モデル構築技術の研究開発

- ・ 電波環境測定の改良分析・評価
- ・ 伝搬モデルの改良・評価

イ 電波環境モニタリング技術の研究開発

- ・ 電波環境モニタリング装置二次試作の改良

ウ 広域無線ネットワーク最適化技術の研究開発

- ・ 広域無線ネットワーク制御装置及び最適通信方式選択対応無線装置の改良
- ・ 電波環境モニタリング技術及び広帯域無線ネットワーク最適化技術のシステム統合/総合検証

5. 実施期間

平成 30 年度から 32 年度までの 3 年間

6. その他

(1) 成果の普及展開に向けた取組等

①国際標準化等への取組

国際競争力の強化を実現するためには、本研究開発の成果を研究期間中及び終了後、速やかに関連する国際標準化規格・機関・団体へ提案を実施することが重要である。このため、研究開発の進捗に合わせて、国際標準への提案活動を行うものとする。なお、提案を想定する国際標準規格・機関・団体及び具体的な標準化活動の計画を策定した上で、提案書に記載すること。

②実用化への取組

研究開発期間終了後も引き続き取り組む予定の「本研究開発で確立した技術の普及啓発活動」及び平成 37 年度までの実用化・製品展開等を実現するために必要な取組を図ることとし、その活動計画・実施方策については、提案書に必ず具体的に記載すること。

(2) 提案および研究開発に当たっての留意点

提案に当たっては、基本計画書に記されている目標に対する達成度を評価することが可能な具体的な評価項目を設定し、各評価項目に対して可能な限り数値目標を定めること。また、従来技術との差異を明確にした上で、技術課題及び目標達成に向けた研究方法、実施計画及び年度目標について具体的かつ実効性のある提案を行うこと。

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頂くと共に、実際の研究開発の進め方について適宜指導を頂くため、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。

なお、本研究開発において実用的な成果を導出するための共同研究体制又は研究協力体制について、研究計画書の中にできるだけ具体的に記載すること。

## <基本計画書(案)>

### テラヘルツセンシングシステム基盤技術の研究開発

#### 1. 目的

無線通信利用の急激な増加により生じる周波数のひっ迫状況を緩和し、新たな周波数需要に的確に対応するため、より高い周波数の利用を可能とする技術が求められている。欧米等では、超高速大容量伝送を可能とする無線システム等の周波数移行先として、テラヘルツ電磁波の利用に向けた研究が進んでおり、我が国においても実用化に資するテラヘルツ基盤技術の確立が急がれる。

新たな周波数資源であるテラヘルツ波は、システム小型軽量化の実現性が高いといった優位性を有している。例えば、5GHz 帯の電磁波と比較して 0.5THz 帯では、同じアンテナ利得を得られるパラボラアンテナの直径を 1/10、面積では 1/100 にサイズを小型化することができる。近年、世界各国において数百機規模の小型衛星コンステレーション計画があり、民間企業が衛星リモートセンシングを活用した世界的な気象予報サービス等の新たなビジネスに乗り出すなど、ビジネスが宇宙圏に拡張され、これまで困難であった常時性を確保した小型衛星による 24 時間気象災害モニタリングや通信インフラ整備の実現が目前となっている。搭載機器の重量に大きな制限がかかる小型衛星において、搭載機器の小型化を実現するテラヘルツ波の利用促進が期待されている。さらに、テラヘルツ波帯のうち、500GHz 帯、700GHz 帯、800GHz 帯の周波数については、水蒸気や酸素濃度を正確に把握可能な電気的特性を有しており、激甚化している大型台風の予報等に有効であることから、欧米等の世界的な気象観測機関がテラヘルツ波の応用に注目している。このような状況の中、我が国としてもテラヘルツセンシングシステム利用に関して、宇宙産業における国際競争力の確保の視点からも研究開発に取り組む必要がある。

そこで、本研究開発では、小型衛星への搭載及び水蒸気と酸素の同時スペクトル観測が可能であり、かつ、アンテナが受信する雑音に対する耐性を有するテラヘルツセンシング分光システムの実現に向けた基盤技術の研究開発を実施する。テラヘルツ波を用いたワイヤレスシステムの早期実用化を目指すことで、新たな周波数帯の利用を促進し電波資源の拡大に資するとともに、我が国の国際競争力の強化に寄与する。

#### 2. 政策的位置付け

- ・「宇宙 × ICTに関する懇談会 報告書」(平成 29 年 8 月)

「5-4 ワイヤレス宇宙資源探査ビジネス推進戦略」において、「総務省及び NICT は関係する国内外の研究機関とも連携し、衛星センサシステムの開発を推進することが適当である。開発に取り組むべきセンサ技術としては、水、一酸化炭素、酸素の同位体を高感度で検出でき、かつセンサの小型軽量化を実現できるテ

ラヘルツパッシブセンサを対象とすることが適当である」旨の記載あり。

- ・「宇宙産業ビジョン2030」（平成29年5月宇宙政策委員会策定）

「4.2.2 国際競争力の確保（新型基幹ロケット（H3）、小型ロケット、部品・コンポーネント戦略、調達制度、技術開発）＜技術開発支援策の強化＞」において、「デブリ除去技術、小型 SAR（合成開口レーダー）やテラヘルツセンサー、測位技術、衛星通信用技術、宇宙太陽光発電など、我が国の強みや重要技術を戦略的に強化していくことも重要である。」旨の記載されている。

- ・電波政策 2020 懇談会報告書（平成28年7月）

「第3章1.（2）②（オ）電波資源拡大のための研究開発、周波数ひっ迫対策のための技術試験事務」において、「ミリ波・テラヘルツ分野は研究開発対象の一つとされており、「100GHz 超の電波を利用するための基盤技術の開発及び試験を実施する。」旨の記載されている。

また、「第2章2.（1）IoT 社会を支えるワイヤレスビジネス」において、「低軌道周回衛星によるリモートセンシングビジネスが期待されている。」旨の記載あり。

### 3. 目標

本研究開発は、世界的に周波数分配が行われていない 500GHz 帯付近のテラヘルツ電磁波を用いて、小型衛星に搭載可能な形状（一辺が 50cm の立方体より小型）・重量（10kg 以下）・消費電力（30W 以下）であって、水蒸気と酸素スペクトルの同時観測が可能であり、かつ、テラヘルツセンシング分光システム技術を確立する。また、500GHz 帯付近で動作する小型の増幅素子について、既存技術における利得が 3-4dB 程度であるところ、我が国が 300GHz 帯増幅素子で有する技術を発展させることで、既存技術の利得（3dB 程度）を超える衛星搭載可能な小型高利得増幅素子の開発・実証を行う。テラヘルツ波の実用化に資するこれらの技術を確立することにより、新たな周波数帯の利用を促進し、電波資源の拡大に資するとともに、我が国の国際競争力の強化に寄与する。

### 4. 研究開発内容

#### (1) 概要

世界的にテラヘルツ波の利用に向けた研究が進んでおり、我が国においても実用化に資するテラヘルツ基盤技術の確立が急がれるところ、テラヘルツ波は、システム小型軽量化の実現性が高いといった優位性があることから、小型衛星のセンシングシステム等への利用が期待されている。また、気象観測の分野においては、他周波数からの干渉が少ない帯域として、水蒸気や酸素の観測への利用が期待されている。そこで、本研究では既存のテラヘルツ電波有効利用で開発してきた要素開発の成果を取り入れ、世界で初めてとなる 500GHz 帯のテラヘルツセンシングシステムを開発すると共に、同周波数における小型高利得増幅素子の開発を行う。これにより、小型衛星におけるテラヘ

ルツ波の利用を実現し、新宇宙産業における対し我が国の革新的イニシアティブを促進する。

## (2) 技術課題および到達目標

### 技術課題

#### ア 小型・軽量・低電力な衛星搭載テラヘルツセンシングシステム開発

小型衛星への搭載に向け、小型（一辺 50cm の立方体以下）、軽量（10kg 以下）、低電力（30W 以下）であって、水蒸気と酸素スペクトルの同時観測が可能なヘテロダイン検波等を用いたテラヘルツセンシング分光システムを開発する。既存の類似の日本保有技術では国際宇宙ステーション搭載の超伝導サブミリ波サウンダ（平成 21 年打上げ）があるが、サイズ 1.85m×1m×0.8m、質量は 475kg、電力 340W であり、いずれも 1/10 倍程度となる大幅な改善が必要となる。

#### イ 500GHz 帯電磁波増幅素子の高度化・広帯域化

既存の 300GHz 帯で成立している技術を発展させることにより、500GHz 帯で動作する増幅素子の高度化・広帯域化技術を確立する。500GHz 帯においては 300GHz 帯に比べて 40%程度の増幅素子の微細化が必要となることを考慮すると、増幅素子の利得及び帯域幅への組立誤差の影響が 300GHz 帯に比べて大きくなり、目標とする増幅性能を確保することが課題となる。また、設計・製造技術は高周波増幅器として動作できるよう、他の構成部品との整合性や電力損失の低減等を考慮しなければならない。

### 到達目標

#### ア 小型・軽量・低電力な衛星搭載テラヘルツセンシングシステム開発

下記の性能を有するテラヘルツセンシングシステムを開発する技術を確立する。

- ・一辺 50cm の立方体より小型、重量 10kg 以下、消費電力 30W 以下
- ・500GHz 帯付近の電磁波を用い、衛星軌道から水蒸気と酸素スペクトルの同時計測が可能なヘテロダイン検波等による分光システム
- ・センシングシステムのシステム温度は 10K 以下
- ・衛星搭載品として必要な各種耐性を備えている
- ・得られる酸素と水素の存在量高度分布の解析シミュレーションが可能である

#### イ 500GHz 帯電磁波増幅素子の高度化・広帯域化

下記の性能を有する増幅素子を開発する技術を確立する。

- ・アのテラヘルツセンシングシステムで使用する周波数の電磁波を増幅可能
- ・既存の 500GHz 帯電磁波増幅素子（3dB 程度）より高利得であること

なお、上記の目標を達成するに当たっての年度毎の目標については、以下の例を

想定している。

<平成 30 年度>

ア 小型・軽量・低電力衛星搭載テラヘルツセンシングシステム開発

テラヘルツ波の実用化において必須となる信頼性確保のための電波較正系技術を確立すると共に、衛星搭載可能なテラヘルツセンシングシステムのブレッドボードモデルを開発し、全体構成や設計の検討を行う。

イ 500GHz 帯電磁波増幅素子の高度化・広帯域化

500GHz 帯電磁波増幅素子の設計環境の整備、試作素子の評価環境の整備等を行う。また、素子の微細化に向けた製造プロセスの高度化方法を検討する。

<平成 31 年度>

ア 小型・軽量・低電力衛星搭載テラヘルツセンシングシステム開発

テラヘルツセンシングシステムのエンジニアリングモデルを開発し、衛星搭載成立性と信頼性を確認する。

イ 500GHz 帯電磁波増幅素子の高度化・広帯域化

増幅素子の試作を行い、電気特性（高周波特性等）や機械特性を確認するとともに、成立性を評価し、製造プロセスの改良を行う。

<平成 32 年度>

ア 小型・軽量・低電力衛星搭載テラヘルツセンシングシステム開発

テラヘルツセンシングシステムのフライトモデルを開発し、目標の性能を有していることを確認する。

イ 500GHz 帯電磁波増幅素子の高度化・広帯域化

改良された製造プロセスによる増幅素子の試作を行い、目標とする性能を有していることを実証する。

5. 実施期間

平成 30 年度から 32 年度までの 3 年間

6. その他

(1) 成果の普及展開に向けた取組等

①国際標準化等への取組

国際競争力の強化を実現するためには、本研究開発の成果を研究期間中及び終了後、速やかに関連する国際標準化規格・機関・団体へ提案を実施することが重要である。このため、研究開発の進捗に合わせて、国際標準への提案活動

を行うものとする。なお、提案を想定する国際標準規格・機関・団体及び具体的な標準化活動の計画を策定した上で、提案書に記載すること。

## ② 実用化への取組

研究開発期間終了後も引き続き取り組む予定の「本研究開発で確立した技術の普及啓発活動」及び平成 35 年度までの実用化・製品展開等を実現するために必要な取組を図ることとし、その活動計画・実施方策については、提案書に必ず具体的に記載すること。

## (2) 提案および研究開発に当たっての留意点

提案に当たっては、基本計画書に記されている目標に対する達成度を評価することが可能な具体的な評価項目を設定し、各評価項目に対して可能な限り数値目標を定めること。また、従来技術との差異を明確にした上で、技術課題及び目標達成に向けた研究方法、実施計画及び年度目標について具体的かつ実効性のある提案を行うこと。

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頂くと共に、実際の研究開発の進め方について適宜指導を頂くため、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。

なお、本研究開発において実用的な成果を導出するための共同研究体制又は研究協力体制について、研究計画書の中にできるだけ具体的に記載すること。

## ＜基本計画書(案)＞

### 周波数有効利用のための IoT ワイヤレス 高効率広域ネットワークスキャン技術の研究開発

#### 1. 目的

近年、IoT 機器の数は著しい増加傾向にあり、「平成 29 年版 情報通信白書」によると、2016 年に世界で流通している IoT 機器の数は約 173 億個に及び、2020 年までに 300 億個まで増加するとされている。一方、既に流通している IoT 機器の中には脆弱なものも多々あることから、IoT 機器を狙ったサイバー攻撃は急増している。例えば、平成 28 年 10 月に「Mirai」による大規模な DDoS 攻撃が発生しており、最大で 1.2Tbps の通信が発生したと言われている。したがって、サイバー攻撃の対象となりうる脆弱な IoT 機器に対する対策を早急に講ずることで、大量の不正通信の発生を防ぐことが可能となる。

IoT セキュリティは総合的に対策を講ずることが重要であり、IoT セキュアゲートウェイの開発等の様々な取組が進められているところ、マルウェアへの感染が懸念される既に流通している IoT 機器に対しては、同一構内又は同一建物内に閉じていないインターネット上で行われる広域ネットワークスキャンにより幅広く調査を行い、IoT 機器からの応答によって脆弱な IoT 機器を特定した上で対策を講ずることも有効である。これにより、OS のバージョンアップやバグフィックス等の対策を効率的に実施することが可能になり、制御トラヒックの発生を抑えることができる。

しかし、広域ネットワークスキャンは、IoT 機器が接続されたネットワークに対して網羅的に行うものであるため、IoT 機器が増加している中で既存の遠隔から行う広域ネットワークスキャン技術（以下「既存技術」という。）を用いて広域ネットワークスキャンを行うと、それに係る通信量も膨大になるおそれがある。Cisco 社によると、2020 年には、無線通信がインターネット通信の 8 割弱を占めると予想されており、既存技術を用いた広域ネットワークスキャンの実施は、大量の通信が発生することによる周波数の逼迫を惹起するおそれがある。

これらを踏まえ、広域ネットワークスキャンによる周波数の逼迫を回避するため、周波数の利用状況を自動推定し、周波数が逼迫していないタイミングでの広域ネットワークスキャン技術及び広域ネットワークスキャンに係る通信量を軽減する技術を開発し、効率的な広域ネットワークスキャンを実現し、周波数の有効利用を図る。

#### 2. 政策的位置付け

・「未来投資戦略 2017」（平成 29 年 6 月 9 日閣議決定）

「第 2-II-B-6-(2)」において、「IoT システムの設計・開発・運用に係る概念について、国内において官民が連携してモノ・ネットワーク、システム等に関する

る各種基準等への組込を促進するとともに、(中略) また、IoT 機器のセキュリティ対策の強化に向けて、継続的かつ広範な実態の把握、利用者等への対策の実施・周知、同様の被害を防止する取組等を推進するための官民等の関係者による連携の枠組みを本年度中に構築し、必要な対策を推進する。」との記載あり。

・「サイバーセキュリティ戦略」(平成 27 年 9 月 4 日閣議決定)

「5.1.1(4)」において、「IoT システムを活用した新ビジネスの創出等を促進していくためには、(中略) 従来の情報通信機器とは異なる IoT システムの構成要素の特徴を踏まえ、セキュリティを担保するための技術開発等を進める必要がある。」、また、「IoT システムにおける対策検討等に必要な技術開発・実証事業を行う。」との記載あり。

### 3. 目標

IoT 機器は今後も急速に普及することが想定され、「平成 29 年版 情報通信白書」によると、本研究開発が終了する平成 32 年度には、現状の 2 倍近くになると見込まれている。本研究開発終了後も周波数の逼迫なく、IoT 機器に割り当てられた日本全国のグローバル IP アドレスに対して広域ネットワークスキャンを行うことが可能となるよう、既存技術と比較して広域ネットワークスキャンに係る通信量を 1/4 以下にすることを目標とする。

### 4. 研究開発内容

#### (1) 概要

インターネットに接続された IoT 機器が今後も増加していく中で、既存技術を用いた広域ネットワークスキャンを行う場合、正規通信と重なることによる再送の多発など、悪影響を与えるおそれがある。そのため、正規通信で周波数が比較的に利用されていないタイミングでの広域ネットワークスキャンを行うことや、セキュリティを確保しつつ、広域ネットワークスキャンの回数を最小限に抑えることが重要である。

また、IoT 機器の種類、接続されているネットワーク環境等によって、広域ネットワークスキャンが不要なポートがあることや、IoT 機器に対する IP アドレスの割り当て方が異なっていることから、効率的な広域ネットワークスキャンを行うためにはこれらの特性を把握することが重要である。広域ネットワークスキャンの応答結果に関する情報を蓄積し、それを活用して、IoT 機器毎に特性を推定し、適切な頻度で適切なポートに対してネットワークスキャンを行うことで、効率的な広域ネットワークスキャンを実現することが求められる。

以上を踏まえ、本研究開発では、セキュリティレベルを維持しつつ、通信トラヒックの日変化や時間変化の特性等を考慮し、周波数の利用状況の自動推定による広域ネットワークスキャン技術及び広域ネットワークスキャンの無線通信量軽減技術の開発を行う。

## (2) 技術課題および到達目標

### 技術課題

#### ア 周波数の利用状況の自動推定による広域ネットワークスキャン技術の開発

既存技術では、広域ネットワークスキャンを行うタイミングが制御されていないため、正規通信に係る通信量が多いタイミングに広域ネットワークスキャンが実行されることにより、正規通信に対して悪影響を与えるおそれがある。例えば、200kbps のワイヤレス回線の下り通信速度が、毎秒 100 パケットでスキャンを行った場合には 4/5 まで、毎秒 700 パケットでスキャンを行った場合には 1/3 まで低下したとの調査結果もある。また、通信量が多い時間帯に広域ネットワークスキャンを行えば、通信の再送が発生し、広域ネットワークスキャンそのものの効率性も低下することとなる。そのため、周波数が比較的利用されていない時間帯に広域ネットワークスキャンを実行することが求められる。

さらに、広域ネットワークスキャンによる IoT 機器からの応答を基に得られる情報は、広域ネットワークスキャンの成否や遅延時間の情報のみであり、効率的に広域ネットワークスキャンを行うためには、その失敗原因や遅延の発生原因を特定することが必要である。

IoT 機器の急速な普及により、アクセスポイントや基地局の数は増加傾向にあり、これらの各ネットワークにおける電波環境の分析に係る計算量は膨大である。この計算量を軽減し、効率的に分析することが求められる。

本研究開発では、広域ネットワークスキャンの成否や遅延に関する原因を高精度に推定する技術（以下「広域ネットワークスキャン遅延原因等推定技術」という。）、同一の電波環境下にあると見なせる複数のアクセスポイントや基地局をクラスタリングすることで計算量を軽減する技術（以下「クラスタリングを用いた計算量軽減技術」という。）、周波数の利用状況を推定した結果等に基づいて、広域ネットワークスキャンの実行タイミングを適切に制御する技術（以下「広域ネットワークスキャン最適制御技術」という。）の開発を行う。

#### イ 広域ネットワークスキャンの無線通信量軽減技術の開発

既存技術では、広域ネットワークスキャンの対象となる IP アドレスに対して、少なくとも週に 1 回の頻度でネットワークスキャンが行われているため、IoT 機器の最新の状態を常に把握することは困難である。この問題を解消するためには、日々広域ネットワークスキャンを実施し、IoT 機器の最新の状態を観測する必要がある。

しかしながら、ネットワークの用途や接続されている IoT 機器によって、ネットワークスキャンに対する応答の傾向は大きく異なる。また、応答する IoT 機器が頻繁に変化する IP アドレスもあれば、ほとんど変化しない IP アドレス

もあることを踏まえると、ネットワークの用途や、過去に当該 IP アドレスで応答した IoT 機器の傾向に基づいて、適切な広域ネットワークスキャンの頻度や間隔を 1 日に 1 回、数日に 1 回等とネットワーク毎に設定することが可能である。この方法を用いると、ネットワークスキャン試行回数を、既存技術を用いて日々広域ネットワークスキャンを行う場合に比べ、約 1/2 に抑えられる可能性がある。

また、IoT 機器の種類に応じて、使用されるポートは異なることが想定されるが、既存技術では、IoT 機器の種類に応じて広域ネットワークスキャンの対象ポートを変えていないため、非効率である。広域ネットワークスキャンの対象となるポートには、様々な IoT 機器で利用されているものと、特定の IoT 機器のみで利用されているものがある。そのため、全てのポートに対してネットワークスキャンを行うことなく、IoT 機器の種類に応じて、ネットワークスキャンによる応答等を確認することで、当該 IoT 機器の特定につながる情報を得られる。その結果、広域ネットワークスキャンの対象となるポートの数よりも、少ない回数のネットワークスキャンで IoT 機器の種類を特定することが可能である。この方法を用いると、広域ネットワークスキャンを行う際のネットワークスキャン試行回数を、既存技術を用いて広域ネットワークスキャンを行う場合に比べ、約 1/2 に抑えられる可能性がある。

本研究開発では、広域ネットワークスキャンの頻度を最適化する技術（以下「広域ネットワークスキャン頻度最適化技術」という。）及び広域ネットワークスキャンを実施するポートを選定する技術（以下「広域ネットワークスキャン対象ポート選定技術」という。）の開発を行う。

## 到達目標

### ア 周波数の利用状況の自動推定による広域ネットワークスキャン技術の開発

広域ネットワークスキャン遅延原因等推定技術、クラスタリングを用いた計算量軽減技術、広域ネットワークスキャン最適制御技術により、周波数の利用状況の自動推定を行い、広域ネットワークスキャンのタイミングを適切に制御する機能を、広域ネットワークスキャンを行う機器に実装する。これにより、再送を含めた広域ネットワークスキャンに係る通信量を 1/2 に軽減し、効率的な広域ネットワークスキャンを実現する。

### イ 広域ネットワークスキャンの無線通信量軽減技術の開発

広域ネットワークスキャン頻度最適化技術の開発において、広域ネットワークスキャンを定期的に行い、各試行の差分を解析する実態調査によりネットワーク環境推定方式を設計し、この方式を用いた広域ネットワークスキャンの実証を行う。その結果に基づき、広域ネットワークスキャン対象機器推定方式を設計することで、広域ネットワークスキャンの効率性を既存技術と比較して 2 倍にする。

また、広域ネットワークスキャン対象ポート選定技術の開発において、広域ネットワークスキャンの応答を解析することでポート選定方式を設計し、この方式を用いた実証を行う。その結果に基づき、広域ネットワークスキャン対象機器推定方式を設計することで、広域ネットワークスキャンの効率性を既存技術と比較して2倍にする。

両技術を組み合わせ、IoT 機器に応じた広域ネットワークスキャンの頻度を最適化する機能及びポートを選定する機能を、広域ネットワークスキャンを行う機器に実装する。これにより、広域ネットワークスキャンに係る通信量を既存技術と比較して1/4に軽減し、全グローバル IP アドレスのスキャンに45分を要する既存技術よりも効率的な広域ネットワークスキャンを実現する。

なお、上記の目標を達成するに当たっての年度毎の目標については、以下の例を想定している。

#### <平成 30 年度>

##### ア 周波数の利用状況の自動推定による広域ネットワークスキャン技術の開発

###### アー1 広域ネットワークスキャン遅延原因等推定技術

模擬環境における広域ネットワークスキャンの成否及び遅延特性の測定並びに分析・評価を行う。また、模擬データを用いて広域ネットワークスキャン未応答原因分析アルゴリズムと広域ネットワークスキャン応答遅延発生原因分析アルゴリズムの基本検討を行う。

###### アー2 クラスタリングを用いた計算量軽減技術

模擬データを用いたクラスタリングアルゴリズムの基本検討を行い、その結果に基づき、クラスタリングプログラムの一次試作を行う。

###### アー3 広域ネットワークスキャン最適制御技術

模擬データを用いた広域ネットワークスキャンタイミング制御アルゴリズムの基本検討を行い、その結果に基づき、広域ネットワークスキャンタイミング制御装置の一次試作を行う。

##### イ 広域ネットワークスキャンの無線通信量軽減技術の開発

###### イー1 広域ネットワークスキャン頻度最適化技術

簡易的な広域ネットワークスキャナを用いて広域ネットワークスキャンを定期的に行い、各試行の差分を解析する実態調査を行う。また、実態調査に基づき、ネットワーク環境推定方式を設計する。

###### イー2 広域ネットワークスキャン対象ポート選定技術

簡易的な広域ネットワークスキャナを用いて広域ネットワークスキャンを行い、応答を解析する実態調査を行う。また、実態調査に基づき、ポート選定方式を設計する。

<平成 31 年度>

ア 周波数の利用状況の自動推定による広域ネットワークスキャン技術の開発

アー 1 広域ネットワークスキャン遅延原因等推定技術

実環境におけるネットワークスキャンの成否及び遅延特性の測定並びに分析・評価を行う。また、実環境データを用いて広域ネットワークスキャン未応答原因分析アルゴリズムと広域ネットワークスキャン応答遅延発生原因分析アルゴリズムの詳細検討を行う。

アー 2 クラスタリングを用いた計算量軽減技術

実環境データを用いたクラスタリングアルゴリズムの詳細検討を行い、その結果に基づき、クラスタリングプログラムの二次試作を行う。

アー 3 広域ネットワークスキャン最適制御技術

実環境データを用いた広域ネットワークスキャンタイミング制御アルゴリズムの詳細検討を行い、その結果に基づき、広域ネットワークスキャンタイミング制御装置の二次試作を行う。

イ 広域ネットワークスキャンの無線通信量軽減技術の開発

イー 1 広域ネットワークスキャン頻度最適化技術

設計したネットワーク環境推定方式を用いた広域ネットワークスキャンの実証を行う。また、収集した情報を解析し、広域ネットワークスキャン対象機器推定方式を設計する。

イー 2 広域ネットワークスキャン対象ポート選定技術

設計したポート選定方式を用いた広域ネットワークスキャンの実証を行う。また、収集した情報を解析し、広域ネットワークスキャン対象機器推定方式を設計する。

<平成 32 年度>

ア 周波数の利用状況の自動推定による広域ネットワークスキャン技術の開発

アー 1 広域ネットワークスキャン遅延原因等推定技術

実環境データを用いて広域ネットワークスキャン未応答原因分析アルゴリズムと広域ネットワークスキャン応答遅延発生原因分析アルゴリズムの改良検討を行う。

アー 2 クラスタリングを用いた計算量軽減技術

実環境データを用いたクラスタリングアルゴリズムの改良検討を行い、その結果に基づき、クラスタリングプログラムの最終試作を行う。

アー 3 広域ネットワークスキャン最適制御技術

実環境データを用いた広域ネットワークスキャンタイミング制御アルゴリズムの改良検討を行い、その結果に基づき、広域ネットワークスキャンタイミング制御装置の最終試作を行う。

イ 広域ネットワークスキャンの無線通信量軽減技術の開発

広域ネットワークスキャン対象機器推定方式を用いた広域ネットワークスキャンの実証を行う。

ウ システム統合・総合評価

ア－１、ア－２及びア－３並びにイの技術のシステム統合・総合評価を行う。

5. 実施期間

平成 30 年度から 32 年度までの 3 年間

6. その他

(1) 成果の普及展開に向けた取組等

①国際標準化等への取組

国際競争力の強化を実現するためには、本研究開発の成果を研究期間中及び終了後、速やかに関連する国際標準化規格・機関・団体へ提案を実施することが重要である。このため、研究開発の進捗に合わせて、国際標準への提案活動を行うものとする。なお、提案を想定する国際標準規格・機関・団体及び具体的な標準化活動の計画を策定した上で、提案書に記載すること。

②実用化への取組

研究開発期間終了後も引き続き取り組む予定の「本研究開発で確立した技術の普及啓発活動」及び平成 37 年度までの実用化・製品展開等を実現するために必要な取組を図ることとし、その活動計画・実施方策については、提案書に必ず具体的に記載すること。

(2) 提案および研究開発に当たっての留意点

提案に当たっては、基本計画書に記されている目標に対する達成度を評価することが可能な具体的な評価項目を設定し、各評価項目に対して可能な限り数値目標を定めること。また、従来の技術との差異を明確にした上で、技術課題及び目標達成に向けた研究方法、実施計画及び年度目標について具体的かつ実効性のある提案を行うこと。

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頂くと共に、実際の研究開発の進め方について適宜指導を頂くため、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。

なお、本研究開発において実用的な成果を導出するための共同研究体制又は研究協力体制について、研究計画書の中にできるだけ具体的に記載すること。

## ＜基本計画書(案)＞

IoT 機器増大に対応した有無線最適制御型電波有効利用基盤技術の研究開発  
～光ファイバ無線技術によるモバイルフロントホールの大容量化・高効率化技術～

### 1. 目的

多種多様でかつ莫大な数(2020年には500億台以上と推測)のIoT機器の普及に伴い、周波数のひっ迫や他の無線システムとの混信への対応が必要となっている。また、IoT機器は適用するアプリケーションによって、多接続・低処理、大容量、低遅延等の多様な利用ニーズへの対応も重要であることから、IoT機器と接続する無線ネットワークにおいて、柔軟なサービス提供を可能とするため、センサーネットワークのアプリケーションの特徴に基づく空間的・時間的に格段に緻密な電波利用を実現する有線・無線ネットワーク統合制御技術を確立する。

この技術により、IoTサービス毎の要件に合わせた有線・無線区間の最適制御を実現することで、センサーネットワーク(センサー端末からセンサー基地局まで)の周波数利用効率を3倍以上に向上させ、かつ、センサーネットワークを収容する無線システム(センサー基地局からセンサー基地局を束ねる無線基地局まで)の周波数利用効率を3倍以上に向上させることを目指す。また、国際標準を獲得することで、我が国の国際競争力の強化に寄与する。

### 2. 政策的位置付け

- 「周波数再編アクションプラン(平成29年11月改定版)」(平成29年11月 総務省)

#### 新しい電波利用の実現に向けた研究開発等

##### (2-2) 人を介さない機器間通信(M2M)の拡大

機器と機器間の通信であるM2Mシステムやワイヤレスセンサーネットワークの飛躍的拡大により、人、様々な家電や設備、家、車、電車、インフラをはじめとしたあらゆる「もの」がワイヤレスでつながりうる社会が実現すると想定されることから、以下について取り組む。

- ① 920MHz帯、2.4GHz帯及び5GHz帯の電波を利用するIoTシステムにおいて、IoTの超多数同時接続や低遅延化に対応するため、ネットワーク仮想化技術やプラットフォーム技術等を応用することにより、IoT機器とネットワークの有線・無線一体となったIoTシステム全体を最適に制御し、周波数の有効利用を図る技術等の研究開発を推進する。

- 「科学技術イノベーション総合戦略2017」(平成29年6月 閣議決定)  
第2章 未来の産業創造と社会変革に向けた新たな価値創出の取組  
(2) 新たな経済社会としての「Society5.0」を実現するプラットフォーム  
[C]重きを置くべき取組

## ②プラットフォームを支える基盤技術の強化

### ii) フィジカル空間（現実空間）関連の基盤技術の強化

- ・新たな産業や技術基盤の創出の核となる先端レーザー等の量子ビーム利用技術の高度化、次世代の材料・デバイス開発等を支える高度計測・シミュレーション技術、従来精度や感度の限界を超えたイメージング・センシング技術、電気信号を光信号に変えることで高速かつ低消費電力で情報処理を行う光エレクトロニクス技術、高速大容量光通信技術の開発など光・量子技術等に係る研究基盤の強化

- ・「将来のネットワークインフラに関する研究会」（平成 29 年 7 月 18 日）

## 第 6 章 将来のネットワークインフラの実現に向けて

### （1）ネットワークの高度化

将来のネットワークインフラの進展を支えるのは技術革新である。マルチコアファイバ技術、アナログ RoF (Radio over Fiber) 伝送技術等の光伝送技術（コア・アクセス）やネットワークスライシング技術など、我が国が強みを有するネットワーク技術の研究開発や標準化について今後も産学官が連携して強力に推進していく必要がある。

## 3. 目標

我が国が抱える諸課題の解決や新たなビジネス創出等への寄与に期待される IoT 機器が社会の隅々まで深く浸透していくためには、それを支える有線・無線ネットワークの大容量化・高効率化が重要である。特に、2020 年に実用化が予定される第 5 世代移動通信システム（5G）の本格的な普及・展開を見据え、都心の鉄道駅や大型スタジアム等のように、人の往来が激しくトラヒックが集中する場所・施設における 5G を支える有線ネットワークの検討は急務である。

現在、都心の鉄道駅周辺や大型スタジアム等においては、基地局の設置スペース・消費電力に関する制約、隣接基地局間の干渉抑制等の置局ニーズに対応するため、数キロ～数十キロメートル程度のモバイルフロントホール（MFH）をチャネル多重化したデジタル RoF（CPRI フォーマット）伝送しているが、5G 設備の導入に当たっては、以下の課題に対する技術革新が必要となる。

- ①5G で想定される大容量通信（下り伝送速度 20Gbps）を考慮した場合、既存デジタル RoF 伝送では、無線信号を光デジタル信号へ変換する際に広帯域（無線信号の伝送速度の 16 倍）が必要となり、効率的な収容が困難
- ②5G で想定される使用周波数帯（ミリ波）を考慮した場合、基地局の超高密度配置を実現するため、アンテナ側装置（RRH:Remote Radio Head）の更なる小型化・低消費電力化に加え、隣接基地局間の干渉抑制及び周波数利用効率の向上が必要

そこで本研究開発では、これらの課題に対応するため、①無線信号をそのまま光信号に変換・伝送するため、デジタル RoF 伝送に比べて大幅に信号帯域を削減可能

であり、②RRH側のデジタル信号処理（DSP）が不要で、装置の更なる小型化・低消費電力化が可能という特徴を有する光ファイバ無線技術（アナログ RoF 伝送）高度化のための研究開発に取り組むこととする。

具体的には、今回想定する都心の鉄道駅周辺や大型スタジアム等の数キロ～数十キロメートル程度の MFH にアナログ RoF 伝送を適用した場合における、①中・長距離伝送時の信号劣化、チャンネル多重・分離に対応したハイブリッド型アナログ RoF フロントホール技術、②隣接基地局間の干渉抑制、周波数利用効率向上に対応したフォトニックビームステアリング基盤技術を確立する。これにより、5G の大容量通信に対応した MFH の高効率伝送を実現するとともに、ビームステアリング技術による同一周波数の繰り返し利用を促進し、周波数利用効率を3倍以上に向上させることを目指す。

#### 4. 研究開発内容

##### (1) 概要

総務省では、平成 29 年度から実施の「IoT 機器増大に対応した有無線最適制御型電波有効利用基盤技術の研究開発」（平成 29～32 年度）において、「短距離無線アクセスネットワークの大容量化技術」の開発が進められている。当該研究開発は、低遅延・低コストな構成で大容量通信が実現できる光ファイバ無線技術に着目し、高い線形性・高速性を有する電気-光変換デバイスの開発等に取り組むものであるが、数百メートル程度の比較的短い伝送距離を対象としたものであり、当該技術を今回想定する数キロ～数十キロメートル程度の MFH に適用する場合、信号劣化への対応、チャンネル多重・分離機能の実装をはじめとする中・長距離伝送時の課題等が生じる。

そこで本研究開発「光ファイバ無線技術によるモバイルフロントホールの大容量化・高効率化技術」では、①中・長距離伝送時の信号劣化、チャンネル多重・分離に対応したハイブリッド型アナログ RoF フロントホール技術、②隣接基地局間の干渉抑制、周波数利用効率向上に対応したアナログ RoF 伝送用フォトニックビームステアリング基盤技術を確立することで、今回想定する都心の鉄道駅周辺や大型スタジアム等における 5G 設備導入の円滑化、周波数利用効率の向上を図る。

##### (2) 技術課題および到達目標

###### 技術課題

###### ア ハイブリッド型アナログ RoF フロントホール技術

中・長距離伝送時における信号劣化、チャンネル多重・分離に対応するため、多数の無線信号チャンネルを中間周波数に変換・多重化して伝送する IF-over-Fiber (IFoF) 伝送方式と、最終的に空間へ放射する無線信号の周波数で伝送するアナログ RoF 伝送方式を組み合わせた IFoF・アナログ RoF ハイブリッド伝送技術について検討する。具体的には、IFoF 伝送信号からアナログ RoF 伝送信号に変換する

際の信号劣化を抑制するチャンネル多重・分離／周波数変換技術等を確立する。

#### イ フォトニックビームステアリング基盤技術

隣接基地局間の干渉抑制、周波数利用効率向上に対応するため、課題アで検討した MFH 伝送技術を前提とした、光信号の強度／位相制御による無線信号のビームステアリング技術等を確立し、フォトニックアレイアンテナの試作を行う。

### 到達目標

#### ア ハイブリッド型アナログ RoF フロントホール技術

IFoF・アナログ RoF ハイブリッド伝送技術を確立することで、20 キロメートル程度の MFH 伝送時において、ユーザデータレート換算で 20Gbps の 5G 無線信号を 3GPP TS 36.104 V14.6.0 で規定される信号品質（64QAM で EVM (Error Vector Magnitude) が 8%以下) で伝送可能とする。加えて、既存デジタル RoF 伝送と比較して、必要となる信号帯域を 1/30 以下とする。

#### イ フォトニックビームステアリング基盤技術

課題アで検討した MFH 伝送技術を前提とした、光信号の強度／位相制御による無線信号のビームステアリング技術等を確立し、アンテナあたりの同一周波数収容可能ユーザ数を 4 以上とするフォトニックアレイアンテナによる Massive MIMO 機能を実現することで、課題アを含めたシステム全体としての周波数利用効率を 3 倍以上に向上させる。加えて、既存デジタル RoF 伝送の RRH と比較して、1 チャンネルあたりのアンテナサイズ・消費電力を 1/2 以下とする。

なお、上記の目標を達成するに当たっての年度毎の目標については、以下の例を想定しているが、提案する研究計画に合わせて設定して良い。

#### <平成 30 年度>

##### ア ハイブリッド型アナログ RoF フロントホール技術

- ・ハイブリッド型アナログ RoF フロントホール技術に係るアーキテクチャの検討を行う。

##### イ フォトニックビームステアリング基盤技術

- ・課題アで検討したアーキテクチャを踏まえたフォトニックビームステアリング技術の検討を行う。

#### <平成 31 年度>

##### ア ハイブリッド型アナログ RoF フロントホール技術

- ・ハイブリッド型アナログ RoF フロントホール技術に係る機能検証を行う。

##### イ フォトニックビームステアリング基盤技術

- ・フォトニックビームステアリング技術を用いたフォトニックアレイアンテナの

試作・評価を行う。

<平成 32 年度>

ア ハイブリッド型アナログ RoF フロントホール技術

・ハイブリッド型アナログ RoF フロントホール技術の実証試験を行う。

イ フォトニックビームステアリング基盤技術

・課題アとの連携のもと、フォトニックビームステアリング基盤技術の実証試験を行う。

## 5. 実施期間

平成 30 年度から 32 年度までの 3 年間

## 6. その他

### (1) 成果の普及展開に向けた取組等

#### ①国際標準化等への取組

国際競争力の強化を実現するためには、本研究開発の成果を研究期間中および終了後、速やかに関連する国際標準化規格・機関・団体へ提案を実施することが重要である。このため、研究開発の進捗に合わせて、国際標準への提案活動を行うものとする。なお、提案を想定する国際標準規格・機関・団体および具体的な標準化活動の計画を策定した上で、提案書に記載すること。

#### ②実用化への取組

研究開発期間終了後も引き続き取り組む予定の「本研究開発で確立した技術の普及啓発活動」および平成 37 年度までの実用化・製品展開等を実現するために必要な取組を図ることとし、その活動計画・実施方策については、提案書に必ず具体的に記載すること。

### (2) 提案および研究開発に当たっての留意点

提案に当たっては、基本計画書に記されている目標に対する達成度を評価することが可能な具体的な評価項目を設定し、各評価項目に対して可能な限り数値目標を定めること。また、従来技術との差異を明確にした上で、技術課題および目標達成に向けた研究方法、実施計画および年度目標について具体的かつ実効性のある提案を行うこと。

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頂くと共に、実際の研究開発の進め方について適宜指導を頂くため、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。

なお、本研究開発において実用的な成果を導出するための共同研究体制又は研究協力体制について、研究計画書の中にできるだけ具体的に記載すること。