

## ＜基本計画書＞

### 基地局端末間の協調による動的ネットワーク制御に関する研究開発

#### 1. 目的

我が国では、2020 年3月から移動体通信事業者によって、第5世代移動通信システム(5G)の商用サービスが開始された。5G 及びその後継となる移動通信システムは、スマートフォン及びモバイル端末のような単なるコミュニケーション基盤としての活用にとどまらず、生活基盤、更には産業・社会基盤となることが期待されている。特に、2020 年に発生したCOVID-19 の感染拡大によって、新たな生活様式が社会に浸透し、デジタルベースでの非接触のコミュニケーション及び生活様式がニューノーマルとなる中、ユーザ端末にて大容量のデータを消費するだけでなく、高品質画像やリアルタイム性を重視した遠隔医療や遠隔地にある重機等のリモート操作、リモートオフィスや遠隔授業など、ユーザ端末側から大容量・高速なデータの伝送が必要となるユースケースの実現が求められている。

こうした大容量・高速伝送が要求されるユースケースにおいては、広帯域が確保可能なミリ波帯である高周波数帯を利用することが考えられる。しかしながら、ミリ波帯は SHF 帯以下に比べ、直進性が強く障害物に弱いという性質がある。このため、建造物等の陰での不感地帯が発生する。高周波数帯の不感地帯を局限するための解決方法の一つとして、高周波数帯の基地局を稠密に設置する必要があるが、設置コスト及び消費電力等の観点で現実的な方法ではない。そこで、本研究開発では、基地局の設置に依らず、高周波数帯の不感地帯を局限するための取組として、任意の方向に電波を反射させることで、高周波数帯の不感地帯を局限する IRS(Intelligent Reflecting Surface)を移動通信システムへ適用するための研究開発を行う。

また、通信距離の延伸化を図るためには、利得の大きなアンテナ(径の大きなアンテナ)や高出力デバイスを用いて有効放射電力の増大を実現する必要があるが、可搬性を考慮すると携帯する端末への適用は困難である。このため、下りリンクに対して、上りリンク通信性能劣位が発生し、それがボトルネックとなることが高周波数帯の利用促進を阻害する要因となっており、高周波数帯をより有効に活用するための手段が求められている。そこで、本研究開発では、上りリンクを高速化するための解決するための取組として、高周波数帯の上りリンクの中継システムを移動通信システムへ適用するための研究開発を行う。

#### 2. 政策的位置付け

・Beyond 5G 推進戦略懇談会提言(令和2年6月)

「4.Beyond 5G 推進戦略 4-2.(3)(開発・製造基盤の強化)」において、「(略)このため、5G の機能強化に対応した情報通信システムの中核となる技術を開発することにより、その開発・製造基盤強化に取り組む。」旨の記載あり。

・まち・ひと・しごと創生基本方針 2020(令和2年7月 17 日閣議決定)

「6.新しい時代の流れを力にする(1)②(a)5G などの情報通信基盤の早期整備」において、「(略)5G やローカル 5G による地域の課題解決、5G の高度化・高信頼化を推

進する。」旨の記載あり。

- ・世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（令和2年7月 17 日閣議決定）

「7 社会基盤の整備(2) 次世代インフラの整備」において、「また、Society 5.0 をより高いレベルで実現していくためには、サイバー空間と現実世界（フィジカル空間）をより高度に一体化させる必要があり、それを支える中核的なインフラとしては 5G よりも更に高度なネットワークが求められる。」旨の記載あり。

### 3. 目標

ミリ波帯は、広帯域を利用できるため大容量・高速通信の実現が期待出来る一方で高周波数帯の直進性に起因し、ビル等の建造物や電波の遮蔽物によって不感地帯が多数発生しうる。基地局を多数設置せずに不感地帯への対策として、伝搬環境の変化に応じて、電波の反射方向を動的に変更可能な高機能な反射板（IRS）が有効であると考えられる。IRS をビル壁等の様々な場所に設置し、エリア内に発生する不感地帯へ適切に電波を反射させることで、ビル陰に位置する歩行者などが利用するユーザ端末との通信の実現が期待できる。5G 以降の移動通信システムにて今後利用が想定される EHF 帯（47.2-48.2GHz、66-71GHz 等）の周波数にて、ユーザ端末と基地局間に位置する電波遮蔽物を迂回した伝搬路を構築するための IRS システムを実現する。5G NR の通信規格として、一定時間（discard timer：最長で 1.5 秒）電力が低い状態が続くとパケットが損失し、通信サービスが切断する可能性があることから、IRS を用いて不感地帯をエリア化し、当エリア内において電波の反射方向をユーザ端末の移動に追従することで、通信中の受信電力が最低受信感度以下となる連続時間を 1.5 秒以内かつ時間率 1%以下とすることを目標とする。

ミリ波帯を用いた移動通信システム（28GHz 帯や今後利用が想定される EHF 帯の移動通信システム）では、ユーザ端末の可搬性から生じるアンテナサイズや最大送信電力などの制約により、ユーザ端末から基地局への上りリンクは伝送不可又は低速伝送しか出来ない場合がある。一方で、高精細な映像伝送を利用した遠隔地の重機のリモート操作を実現するために高速な上りリンクが必要な利用シーンも今後出現されることが想定される。そこで、ユーザ端末及び基地局の伝搬路の間に中継通信端末を設置し、上りリンクの速度向上を図る。先述の利用シーンにおいては、重機の移動に伴い、中継通信端末が移動できる必要があるため、中継通信端末はドローン等に搭載されることを想定する。この中継通信システムを活用することで、見通し内空間多重伝送により伝送容量を 5G の 4 倍に向上させ、5G の中継方式に対して中継による遅延時間を 60%に短縮しつつ、ユーザ単体の伝送速度を 5G の 4 倍に向上させることを目標とする。

### 4. 研究開発内容

#### (1) 概要

これまでも、電波の反射方向を可変に出来る IRS に関する研究が報告されている。本研究開発では、新たに IRS の性能向上を図りつつ、IRS を移動通信システムに適用さ

せるための研究開発を行う。ミリ波帯基地局と不感地帯にあるユーザ端末の伝搬路を構築するための IRS は、効率的に電波を反射させるために、低損失で波長の 100 倍程度のサイズが必要となる。高速に電波の反射方向を変更するためには、IRS 面内の素子が高速に変化しうる応答速度を有している必要がある。こうした性質を有する IRS の部分モデルを試作・評価の後、性能の向上を図り、大型の IRS を試作し、反射方向を制御するための高速な応答が可能な IRS の構成技術を実現する。また、複数のユーザ端末と基地局が通信するため、複数のユーザ端末との伝搬路を構築可能な反射パターン(電波の反射強度の方位依存性)をユーザ端末の移動に応じて変更するために、IRS 面内の各反射素子の制御量を高精度に導出する必要がある。移動通信システムでは隣接した周波数帯で複数のオペレータが利用することから、他のオペレータのシステムに障害とならない反射制御が必要である。こうした制御を実施するアルゴリズムを構築し、IRS の制御器に実装することで、IRS の反射特性制御技術を実現する。さらに、IRS で適切な方位に電波を反射させるためには、IRS、基地局及びユーザ端末の位置関係(各器材の相対方位)の特定し、電波の入射角に伴う反射パターンを決定する必要がある。この際、ユーザ端末は移動しうるため、相対方位の関係を都度更新する必要がある。これを実現するために、IRS が、ユーザ端末及び基地局と連携し、IRS の反射パターンを決定する IRS 協調技術を実現する。これらを実現することで、従来では高周波数帯にてユーザ端末と基地局間の伝送路中に電波の遮蔽物が存在し、通信が確立しなかった場合においても高速に伝送路を構築し、不感地帯の対策エリアを拡大すると共に、高い通信サービスの継続性を実現する。

ドローン等の中継通信端末を搭載した場合、見通しが取れた伝搬路を形成することが可能であり、通信距離の延伸化が図れるものの、MIMO アンテナを活用したマルチパスを利用する空間多重伝送を適用することは出来ない。そこで、本事業では中継通信端末が具備する機能として、見通しがとれた伝搬路において、中継通信端末の移動等によって発生する伝搬路の変動にロバストな空間多重伝送に関する研究開発を実施する。現在までに、机上での見通し内空間多重伝送の実現性は示されており、本研究開発では新たに移動通信システムへの適用可能な実機を実現する。中継通信端末にて、空間多重を実現する信号変換機能を具備し、基地局に複数の移動しうる中継通信端末からの信号を受信できるように、適切なビームの選択と信号分離性能を有するマルチビーム制御の機能を具備する。また、1 台の中継通信端末が複数のユーザ端末を中継する場合、中継通信端末にて干渉が発生し、通信性能全体に対する劣化要因となり得る。そこで、中継通信端末が複数のユーザ端末からの信号の干渉を抑圧しながら空間多重する高効率中継技術を実現する。また、中継通信端末において空間多重処理を実施して中継を行う場合、中継通信端末内で受信した信号を再度送信のための信号処理を行わなければならない、それによる遅延が通信性能全体に対する劣化要因となり得る。5G 以降の移動通信システムにおいては、低遅延の特長を活用したサービスに対応するユースケースも想定されておることから、中継通信端末に中継処理に要する処理時間を低減する低遅延中継技術を実現する。

## (2) 技術課題及び到達目標

### 技術課題

#### ア 高周波数帯 IRS の制御技術

##### ① 反射特性を可変にする IRS の構成技術

移動通信システムの不感地帯を削減するために、任意の反射パターンを形成し、ユーザ端末の移動に追従するように高速に反射パターンを変更する必要がある。さらに、IRS を用いて効率的に電波を反射するためには、低損失かつ大型な IRS が必要となる。このため、大規模なサイズで、任意の反射位相を形成し、反射位相を高速に変更できる構造を有する IRS デバイスの実現が課題となる。

##### ② IRS への反射特性制御技術

広範囲の不感地帯を対策する IRS システムの実現のためには、IRS 面内の各反射素子を制御する信号を生成する必要がある。また、IRS を用いて複数のユーザ端末との接続のために、複数の方向に反射可能な反射パターンを形成する必要がある。広い角度範囲の複数端末に反射可能な反射パターンを生成するために、IRS 面内の各反射素子の制御量を高精度に導出する技術の実現が課題となる。さらに、移動通信システムでは、隣接した周波数帯で複数のオペレータが利用することから、反射したい電波以外を利用しているオペレータに対して障害とならない反射パターンの生成が課題となる。

##### ③ 基地局・ユーザ端末との IRS 協調技術

適切な方位に電波を反射させるためには、電波の入射角に対して適切な反射パターンを決定する必要がある。さらに、IRS はユーザ端末の位置の変動に追従して、電波の反射方向を変更する必要がある。このため、基地局・ユーザ端末と IRS が連携して、ユーザ端末の位置の変動に追従することが課題となる。

#### イ 高周波数帯中継通信端末の協調制御技術

##### ① 移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術

中継通信端末が具備する機能として、見通し内空間多重伝送のための信号処理、少ない処理頻度で空間多重を維持できる信号処理及び中継通信端末のアンテナ構成を実現することが課題となる。また基地局は、空間多重を実現する際に、高 S/N で中継通信端末の信号を取得するために、ビーム選択と信号分離を行うマルチビーム方式の実現が課題となる。

##### ② 移動する中継通信端末による複数ユーザ端末の高効率中継技術

中継通信端末が複数のユーザ端末を收容出来るように、移動する中継通信端末が各ユーザ端末-中継通信端末間の各々異なる伝搬路の状況を考慮し、複数のユーザ端末からの信号による干渉の影響をその伝搬路の情報を基に抑圧しつつ空間多重する高効率な中継方式の実現が課題となる。

### ③ 空間多重を可能とする低遅延中継技術

中継通信端末を介した際にも低遅延サービスに対応する必要があるため、中継通信端末にて中継処理に要する処理時間を低減し、ユーザ端末からの信号を高速に多重化する中継方式の実現が課題となる。

## 到達目標

### ア 高周波数帯 IRS の制御技術

- ・ IRS の反射特性可変デバイス
- ・ IRS の反射特性制御技術
- ・ 基地局・ユーザ端末との IRS 協調技術

大きさが 100 波長程度、反射効率(入射電力の総和に対する反射電力の総和の比率)の低下量が設計角度範囲内のすべての入射反射方向について 6dB 以下で、 $\pm 50^\circ$  以上の範囲に 1.5 秒以内に反射方向を変更可能な IRS を実現する。また、IRS が対策するエリア内において、移動するユーザ端末に反射パターンを追従させることで、通信中の受信電力が最低受信感度以下となる連続時間を 1.5 秒以内かつ時間率 1%以下を実現する。

### イ 高周波数帯中継通信端末の協調制御技術

- ・ 移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術
- ・ 移動する中継通信端末による複数ユーザ端末の高効率中継技術
- ・ 空間多重を可能とする低遅延中継技術

上記の技術を確認することで、伝送容量を 5G の 4 倍、5G の中継方式に対して中継による遅延時間を 60%に短縮しつつユーザ単体の伝送速度を 5G の 4 倍に向上させることを目標とする。

## <令和3年度>

### ア 高周波数帯 IRS の制御技術

#### ① 反射特性を可変にする IRS の構成技術

- ・ 反射パターンを可変に出来る IRS の構造に関する設計
- ・ 小規模な IRS を作成し、IRS 構成素子の損失と応答速度を評価することで、低損失で高速応答可能な大規模 IRS の実現性を評価

#### ② IRS への反射特性制御技術

- ・ IRS の反射特性を制御する制御信号を生成するアルゴリズムの開発及びアルゴリズムの動作性能の評価
- ・ IRS の反射パターン計測システムの設計及び部分試作

#### ③ 基地局・ユーザ端末との IRS 協調技術

- ・ IRS から見たユーザ端末の方位推定方式の設計
- ・ 基地局・ユーザ端末との IRS 協調システムの全体設計、連携する情報の

種類と頻度の具体化及び部分試作

- ・ 反射パターン導出アルゴリズムの開発とシミュレーション評価
- ・ シミュレーションにより、基地局・移動局との IRS 協調システムにおけるユーザ端末の方位推定方式および反射パターン導出アルゴリズムの実現性評価

#### イ 高周波数帯中継端末の協調制御技術

- ① 移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術
  - ・ 移動を考慮した見通し内空間多重伝送方式の設計、シミュレーション及び評価用装置の試作
  - ・ 基地局におけるビーム選択と信号分離を行うマルチビーム信号処理方式の設計、シミュレーション及び評価用装置の試作
- ② 移動する中継通信端末による複数ユーザ端末の高効率中継技術
  - ・ 移動する中継通信端末が複数のユーザ端末からの通信を中継する際に、受信する信号間の干渉を抑圧しながら空間多重する、高効率中継方式の設計及びシミュレーション
  - ・ 中継通信端末及び基地局の機能を有する評価用装置の試作
- ③ 空間多重を可能とする低遅延中継技術
  - ・ 空間多重伝送を可能とする中継通信端末における低遅延中継方式の遅延時間短縮手法の具体化及び全体設計及びシミュレーションによる実現性評価

#### <令和4年度>

#### ア 高周波数帯 IRS の制御技術

- ① 反射特性を可変にする IRS の構成技術
  - ・ IRS の反射パターンを変更する際の応答速度の高速化の実現
  - ・ 大規模 IRS の試作及び反射特性及び IRS の応答速度等を評価
- ② IRS への反射特性制御技術
  - ・ 反射素子の反射特性を高精度に制御するためのアルゴリズムの改良及びシミュレーション評価による実現性評価、並びに制御器の開発
  - ・ 反射パターン計測手法を実装した計測システムの開発
  - ・ 小規模 IRS と制御器を用いた、IRS の反射特性制御技術の実現性実証
- ③ 基地局・ユーザ端末との IRS 協調技術
  - ・ 基地局・移動局との IRS 協調システムに複数のユーザ端末に対応させる追加機能の実装

#### イ 高周波数帯中継端末の協調制御技術

- ① 移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術
  - ・ 移動を考慮した見通し内空間多重方式を効率化する方式の設計、シミュレ

ーションによる実現性評価及び評価用装置の高性能化

- ・ 基地局において高度化したビーム選択と信号分離を行うマルチビーム信号処理方式の高度化方式の設計、シミュレーションによる実現性評価及び評価用装置への追加機能の実装

② 移動する中継通信端末による複数ユーザ端末の高効率中継技術

- ・ 移動する中継通信端末が複数のユーザ端末からの通信を中継する際に、受信する信号間の干渉を抑圧しながら空間多重する、高効率中継方法の高性能化の設計及びシミュレーションによる実現性評価
- ・ 中継通信端末及び基地局の機能を有する評価用装置の高性能化

③ 空間多重を可能とする低遅延中継技術

- ・ 移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術と中継通信端末における低遅延中継方式を組み合わせた統合評価シミュレーション

<令和5年度>

ア 高周波数帯 IRS の制御技術

① 反射特性を可変にする IRS の構成技術

- ・ 大規模 IRS と反射特性制御アルゴリズムを接続して、反射特性を評価

② IRS への反射特性制御技術

- ・ 反射特性制御アルゴリズムに特定の周波数帯の反射を回避する干渉回避機能を追加し、アルゴリズムの動作性能を評価

③ 基地局・ユーザ端末との IRS 協調技術

- ・ 基地局・移動局との IRS 協調システムに端末の移動追従機能を実装

イ 高周波数帯中継端末の協調制御技術

① 移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術

- ・ 移動を考慮した見通し内空間多重方式及び基地局においてビーム選択と信号分離を行うマルチビーム信号処理の機能を含む中継通信端末及び基地局の試作及び性能評価

② 移動する中継通信端末による複数ユーザ端末の高効率中継技術

- ・ 移動する中継通信端末が複数のユーザ端末からの通信を中継する際に、受信する信号間の干渉を抑圧しながら空間多重する高効率中継機能を含む中継通信端末及び基地局の試作及び性能評価

③ 空間多重を可能とする低遅延中継技術

- ・ 移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術及び中継通信端末における低遅延中継方式を具備する評価装置の試作

<令和6年度>

ア 高周波数帯 IRS の制御技術

- ・ 反射特性制御アルゴリズムを実装した大規模 IRS と基地局・移動局との

IRS 協調システムを組み合わせた IRS システムの機能・性能を評価する屋外での総合実証試験を実施

- ・ 大きさが 100 波長程度、反射効率(入射電力の総和に対する反射電力の総和の比率)の低下量が設計角度範囲内のすべての入射反射方向について 6dB 以下で、 $\pm 50^\circ$  以上の範囲に 1.5 秒以内に反射方向を変更可能な IRS を実現する。また、IRS が対策するエリア内において、移動するユーザ端末に反射パターンを追従させることで、通信中の受信電力が最低受信感度以下となる連続時間を 1.5 秒以内かつ時間率 1%以下を実現する。

#### イ 高周波数帯中継端末の協調制御技術

- ・ 統合評価用の中継通信端末及び基地局で見通し内空間多重と複数端末の高効率中継方式を組み合わせて用いた際の伝送容量を評価する統合実証試験を実施
- ・ 伝送容量を 5G の 4 倍とすることを実現する。
- ・ 移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術及び中継通信端末における低遅延中継方式を具備する評価装置を用いて、伝送速度と遅延時間を評価する実証試験を屋外で実施
- ・ 5G の中継方式に対して、遅延時間を 60%に短縮しつつ、ユーザ単体の伝送速度を 4 倍とすることを実現する。

### 5. 実施期間

令和3年度から6年度までの4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」及び令和11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。

以上