

令和7年度から新たに実施する電波資源拡大のための研究開発の基本計画書(案)

研究開発課題	基本計画書(案)
公共ブロードバンド移動通信システムの高度化に関する研究開発	別添1
光回線を代替する高ミリ波帯固定無線通信に関する研究開発	別添2
Ambient IoT システム高度化のための 周波数有効利用技術に関する研究開発	別添3

＜基本計画書(案)＞

公共ブロードバンド移動通信システムの高度化に関する研究開発

1. 目的

令和6年能登半島地震においては、避難所や災害対策拠点等の被災地の通信環境整備のために Starlink 等の衛星インターネット機器が多く用いられた一方、総合行政ネットワーク（LGWAN）のように秘匿性の高い情報を取り扱うクローズドな通信ネットワークに対しては、公衆通信網ではなく専用線での復旧が試みられた。

このような専用線の応急復旧には無線による手段が機動的であるため、令和6年能登半島地震では、公共ブロードバンド移動通信システム（以下、公共 BB という。）が準備された。同地震においては結果的には光ファイバによる復旧が行われたが、広範囲な激甚災害が想定される南海トラフ巨大地震でも、このようなクローズドな通信ネットワークの復旧需要に応える必要がある。

他方、現状の公共 BB は、以下の(1)及び(2)に挙げられるような課題を抱えており、これらの課題を解決することで、巨大地震発生時におけるさらに有効な応急復旧手段となることが期待される。

(1) 通信速度

公共 BB は 2016 年度に地上アナログテレビジョン放送終了後の VHF 帯（200MHz 帯）において、画像伝送等の使用用途にも対応できる自営通信の手段として開発された通信システムであるが、最大通信速度は 10Mbps に止まる。現在、移動通信で広く利用されている通信方式は OFDM 技術をベースとしており、この点は現行の公共 BB と共通しているが、その後の技術の向上や広帯域化等によって移動通信の速度は飛躍的に向上し、一般化している。本通信手段は電気通信業務用ではなく自営通信の手段であることを踏まえても、現在、公共 BB に割り当てられた 1 ユーザの周波数帯域幅（5MHz/チャンネル）において、現在の倍以上の最大伝送速度を実現し、災害現場の映像をより精細にライブで伝送し、遠隔からの対応指示を可能にする等、災害時の情報収集能力を向上する事が望ましい。

(2) 通信距離等

現状の公共 BB の 1 リンクあたりの通信距離は、数 km～10km 程度での運用が一般的であり、無線見通しが確保できる環境にあっても、物理層の実装上の制限により最大でも 30km 程度の通信距離が限界となる。そのような制限に対し、最大 120km の無線伝送を実現する規格は ARIB STD T-119 として制度化されているが、広域とともに被災箇所もスポットでカバーするなど柔軟にカバーエリアを構築できる無線通信網を実現するためには、10～数十 km 程度の無線リンクを複数利用して中継回線を構築することが実用的と考えられる。南海トラフ巨大地震では、全長 100-200km 程度の被災地域が想定されていること等を考慮すると、災害対策に適用する無線システムは、全長 100-200km 程度の広域にわたって広帯域かつ簡

易に無線ネットワークを構築して運用可能であることが求められる。ヘリコプター等の航空機又はドローン等の無人航空機に搭載した無線設備等への同時接続端末数については、発災時から概ね応急復旧時までのユースケースを考察・想定し、ユーザー端末や IoT 機器の収容性能や、中継器の段数と最大遅延のトレードオフのバランスを満たすことも重要となる。

2. 政策的位置付け

WX(ワイヤレストランスフォーメーション)推進戦略～ ワイヤレスサービスにより創造性と多様性が発揮される社会にするために ～ (デジタルビジネス拡大に向けた電波政策懇談会 報告書 2024 年 8 月) の「3-3. 安全・安心な社会の実現 3-3-1. 自然災害への対応」において、「被災地の多地点において災害対策機関が迅速に情報を収集・共有するため、V-High 帯域における公共・公益分野への利用を実現する、既存の公共ブロードバンド移動通信システムの高度化・高速化を図ることが必要である。」旨の記載あり。

3. 目標

VHF 帯 (200MHz 帯) を使用する公共 BB は、災害現場において公共機関が機動的に映像伝送を実現するための無線通信システムとして、現在、国又は地方公共団体等が活用している。

現状数 km～10km 程度の距離を数 Mbps～10Mbps 程度の速度で通信可能であるところ、本研究開発により、更に高速 (20Mbps 超で 4K 画像が伝送可能) な無線通信方式を開発する。また、途中の中継伝送を複数用いて、長距離 (総延長 200km 程度) をカバーできるネットワーク技術を実現する。

このとき、無線設備等をヘリコプター等の航空機又はドローン等の無人航空機に搭載することを想定し空中線を含む物理層改良のアプローチによる無線設備の最適化、軽量化、小型化、複数の無線経路を利用する場合に必要な経路間干渉を考慮した周波数繰返し利用、及び時分割利用等の無線リソース割り当ての最適化技術等の確立も併せて開発する。

これらの技術により VHF 帯 (200MHz 帯) における公共機関等のクローズドな情報通信基盤の応急復旧の手段を確立し、災害時においても周波数の柔軟かつ有効な活用も併せて目指すことを目標とし、通信回線構築の所要時間としては、初見の技術者が 1 通信リンクを 1 時間以内で確立できるような「使い勝手」も達成する。

4. 研究開発内容

(1) 概要

災害対策用の公共 BB を高度化し、新たな VHF 帯広帯域無線通信技術を物理層のアプローチも含めて開発する。これらの技術を現在市販されている無線チップの利用も視野に入れて、経済性も優れた形で達成する。また、同時に、複数の機器を例えば数珠繋ぎ状のリンクで繋ぎ、広範囲にサービスエリアを形成するため、

(2)の技術課題について研究開発を実施し、ユースケースを視野に入れたプロトタイプ機器の試作と評価を通じて開発された技術の有用性を実証結果も含めて検証し、所要の性能を満たせることを確認しながら、公共 BB の高度化を実現するための技術を確立する。なお、技術課題は各サブ課題が密接に連携することに留意するものとする。

(2) 技術課題および到達目標

技術課題

ア 公共 BB 高度化技術

ア-① 無線インターフェースの高度化

災害時、特に広域災害時には、エリアの広大さに伴い、複数のヘリコプター等の航空機又はドローン等の無人航空機などに搭載した無線機器を用いてエンドツーエンドの長距離通信を確立し、中継区間を含めて通信が途切れないようにする必要があるとともに、最大伝送速度も限られることから、情報収集等の活動が効果的に行えないという課題がある。

また、ARIB-STD T119における中継技術は想定する接続ノード数に制限は無いが、市販されている機器の実装上の制限により、中継無線ネットワーク構成の柔軟性が低くなっている現状がある。さらに、大規模なネットワーク構成を想定した無線リソースの効率的な活用に関する機能が不十分であることから、ネットワーク規模を拡大したときに周波数の利用効率低下も懸念される。

ア-② 災害時等の環境変化でも通信リンクを柔軟に運用するルーティング技術

地形・気象・電波状況など様々な環境変化が生じることが想定されるため、複数の通信経路を確立し、特定の通信経路が不通になった場合でも代替経路に切り替えて通信を継続する必要がある。また、特定の通信経路にデータが集中すると輻輳が発生してしまい、エンドツーエンドの通信品質が著しく劣化することも想定されるため、どのデータをどの通信経路で送信するのかを制御する必要がある。一方で、ARIB STD T119による中継技術では動的なネットワークトポロジー変更に対応する機能が不十分となっている。

イ 経路間干渉を考慮した周波数繰返し利用等の技術

1つの周波数を用いてシステムを構築すると、ある中継局において送信された信号が、その中継局が受信する受信信号に干渉として到達してしまう状況（同一周波数干渉）が発生すると、受信特性が著しく劣化してしまう。これに対し、例えば中継局における送受信間の干渉を回避するために、複数の周波数（f1 帯域と f2 帯域など）を用いる等の対策が想定される。一方、複数周波数

を使用することで、同一周波数干渉発生の可能性は軽減できるが、無線リソースの利用効率を最適化するためには、無線ネットワーク全体のリンク間干渉を考慮して、複数の周波数を繰返し利用する必要がある。ARIB STD T119 による中継技術では複数経路間の連携や干渉回避が考慮されていないため、周波数利用効率の面でも課題がある。

ウ 短時間にリンクを確立可能な無線ネットワーク構成技術（遠隔からのシステム設定制御）

巨大地震等の広域災害を想定する場合、機器に精通しない要員でも短時間にネットワークを確立することが避難所や災害対策拠点等の被災地の通信環境整備には必要となる。このため、接続が必要なケーブル類のコネクタ形状、あるいは色分け等による視認性を向上することにより、無線システムに関する専門的な知見を持たない災害対応要員でも短時間にリンクを確立可能なネットワーク構築技術を実現する課題に取り組む。

エ ユースケースを視野に入れたプロトタイプ機器の試作と評価

高度化した公共 BB の性能を引き出すためのユースケースを明確化し、基本機能としてア～ウを具備したプロトタイプ機器の設計と試作および評価を実施し、課題を解決する。ヘリコプター等の航空機又はドローン等の無人航空機へ無線機器を搭載した場合、搭載されている電源、プロペラなどの動力系から無線機器にノイズを発生させることがあり、これらのノイズの影響で無線性能が劣化することがあることに留意する。

到達目標

ア 公共 BB 高度化技術

ア-① 無線インターフェースの高度化

VHF 帯（200MHz 帯）の無線機器を用いて、MIMO、OFDM のサブキャリア変調に多値 QAM を用いる等の手段も参考に、最大伝送容量を従来の公共 BB と比して 2 倍（20Mbps）以上にする高速化技術を開発し、伝送遅延も 2 段中継時で最大 200msec 以内を目標とする。

ARIB - STD T119 による中継技術の方式改良等により、移動する複数のヘリコプター等の航空機又はドローン等の無人航空機などに搭載して、1 リンク 10～数十 km 程度、複数の中継伝送による複数リンクを中継することにより総延長 200km 以上の無線ネットワークが運用可能な技術を開発する。この場合、1 リンク距離 30km 程度を実現した場合、200km をカバーするには最小でも 7 つの無線区間（無線設備数は 8）を直線的に数珠繋ぎする必要がある。なお、このネットワークを形成する上では、VHF 帯を使用するため空中線等のサイズや重量が大きくなりがちであり、搭載する無線設備等のサイズ・重量の軽量小型化、ヘリコプター等の航空機又はドローン等の無人航

空機の性能やスペック（無人航空機の滞在時間・複数リンクの確立・維持・切替）を想定して取り組む必要があることに留意する。

ア-② 災害時等の環境変化でも通信リンクを柔軟に運用するルーティング技術

シームレスに接続するノードを切り替えることが可能なマルチホップルーティング技術等の開発により、特定の通信リンクが不通時にも、通信リンクの切り替え等による最大 200msec 以内の通信の継続を実現する。複数の経路を同時利用することで通信容量の改善が見込める場合はそれらのアプローチも柔軟に取り組むこと。

イ 経路間干渉を考慮した周波数繰返し利用等の技術

ネットワーク全体における経路間の干渉を考慮した周波数の繰返し利用を含む周波数および時間の最適な割り当て技術を開発し、移動する複数の無人航空機などに搭載した VHF 帯（200MHz 帯）の無線機器を用いて、例えば 10MHz 幅で 2 つの異なる周波数（ f_1 と f_2 ）を繰返し利用した状態等で、1 リンク 20Mbps 超の通信速度を実現し、ア及びイの技術も用いて従来の 2 倍以上の周波数利用効率を達成する。この検討においては回り込みキャンセラも 1 つの候補としつつ、ヘリコプター等の航空機又はドローン等の無人航空機などに搭載するという本ユースケースにおける物理的な制約を十分に想定し、可能な他の複数の手段も合わせて最適な対策を取ることで、当該周波数利用効率を達成する。また、提案書において、期待される中継距離およびスループットが可能になる根拠としての技術的なアプローチ（例：基本方式設計案）を盛り込むこと。

ウ 短時間にリンクを確立可能な無線ネットワーク構成技術（遠隔からのシステム設定制御）

初見の技術者が 1 時間以内で無線リンクを確立できる柔軟性の高い無線通信技術を達成する。

エ ユースケースを視野に入れたプロトタイプ機器の試作と評価

ユースケースを明確化し、課題ア～ウの技術課題解決を確認する

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。本目標については、研究開発の進め方を仮に「基本機能設計」、「応用設計」、「プロトタイプ構築」として記載した一例であり、各提案者における研究開発の進捗やフィードバック等において独自の提案がある場合はそれらを明確にし、各段階で達成する目標を提案書に記載すること。

＜令和 7 年度＞

以下の技術の開発について、基本機能設計を実施する。

ア 公共 BB 高度化技術

ア-① 無線インターフェースの高度化

- ・ VHF 帯（200MHz 帯）において、1 リンク 20Mbps 超の通信速度、1 リンク 数十 km 程度の通信距離、複数の中継伝送による複数リンクを中継することにより最大 200km 程度の通信が実現可能なことを計算機シミュレーションにより確認

ア-② 災害時等の環境変化でも通信リンクを柔軟に運用するルーティング技術

- ・ 複数の通信経路を確立し、特定の通信リンクが不通時にも切り替えによる通信の継続が実現可能なこと、具体的にはヘリコプター等の航空機又はドローン等の無人航空機が静止しても複数のリンクを確立する場合を想定し、経路を柔軟に切り替えるルーティング方式の設計、計算機シミュレーションによる実現性の評価

イ 経路間干渉を考慮した周波数繰返し利用等の技術

- ・ ヘリコプター等の航空機又はドローン等の無人航空機が静止して複数のリンクを確立する場合を想定し、ネットワーク全体のリンク間干渉を考慮した周波数繰返し方式の設計、計算機シミュレーションによる実現性の評価
- ・ 上記想定 VHF 帯（200MHz 帯）において、10MHz 幅で 2 つの異なる周波数（ f_1 と f_2 ）を繰返し利用した状態で 1 リンク 20Mbps 超の通信速度が実現可能なことを計算機シミュレーションにより確認

ウ 短時間にリンクを確立可能な無線ネットワーク構成技術（遠隔からのシステム設定制御）

- ・ 通信システムの起動シーケンスとリンク確立手順および遠隔からのシステム設定制御の設計、計算機シミュレーションによる実現性の評価

エ ユースケースを視野に入れたプロトタイプ機器の試作と評価

- ・ ユーザ候補（公共性の高いユーザ）と連携してユースケースを整理し、必要な機能を抽出して課題ア～ウに反映
- ・ 基本機能としてア～エを具備したプロトタイプ機器の設計と一次試作
- ・ 実験室環境における一次試作の評価

＜令和 8 年度＞

以下の技術の開発について、令和 7 年度の基本機能設計を踏まえ、応用設計を実施する。

ア 公共 BB 高度化技術

ア-① 無線インターフェースの高度化

- ・ ヘリコプター等の航空機又はドローン等の無人航空機が移動する環境下においても、1 リンク 20Mbps 超の通信速度、1 リンク 数十 km 程度の通信距離、複数の中継伝送による複数リンクを中継することにより最大 200km 程度の通信が実現可能なことを計算機シミュレーションにより確認、応用設計を実施

ア-② 災害時等の環境変化でも通信リンクを柔軟に運用するルーティング技術

- ・ ヘリコプター等の航空機又はドローン等の無人航空機が移動して複数のリンクを確立する場合を想定し、経路を柔軟に切り替えるルーティング方式の設計、計算機シミュレーションによる実現性の評価 MAC 層の高度化開発と応用設計

イ 経路間干渉を考慮した周波数繰返し利用等の技術

- ・ ヘリコプター等の航空機又はドローン等の無人航空機が移動して複数のリンクを確立する場合を想定し、ネットワーク全体のリンク間干渉を考慮した周波数繰返し方式の設計、計算機シミュレーションによる実現性の評価と応用設計
- ・ ヘリコプター等の航空機又はドローン等の無人航空機が移動する環境下においても、10MHz 幅で 2 つの異なる周波数 (f_1 と f_2) を繰返し利用した状態で 1 リンク 20Mbps 超の通信速度が実現可能なことを計算機シミュレーションにより確認

ウ 短時間にリンクを確立可能な無線ネットワーク構成技術（遠隔からのシステム設定制御）

- ・ 通信システムの起動シーケンスとリンク確立手順および遠隔からのシステム設定制御に基づいて、災害対応要員が初見で 1 時間以内にリンクを確立できることの確認、および最適化

エ ユースケースを視野に入れたプロトタイプ機器の試作と評価

- ・ 整理されたユースケースに基づき、応用設計としてア～ウを具備したプロトタイプ機器の設計と二次試作
- ・ 実験室環境における二次試作の評価

なお、ヘリコプター等の航空機又はドローン等の無人航空機へ無線機器を搭載した場合、搭載されている電源、プロペラなどの動力系から無線機器にノイズを発生させることがあり、これらのノイズの影響で無線性能が劣化することがある。このため、二次試作においては、電源、動力系のノイズの影響を緩和する仕組み（機器の構成や設置方法、方式での対応など）

を考慮する。

<令和9年度>

令和7年度から令和8年度までの成果を踏まえ、フィールド環境においてプロトタイプシステムの構築及び統合試験を実施する。

5. 実施期間

令和7年度から9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」及び令和14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)>

光回線を代替する高ミリ波帯固定無線通信に関する研究開発

1. 目的

現在、全国における光回線の整備率は 99.84%（令和 6 年 1 月総務省公表。令和 5 年 3 月末時点の数字）まで進捗しており、大容量かつ可用性の高い光ファイバは、我が国における重要な通信インフラとなっている。一方、地理的、物理的な理由や費用対効果等の面から光回線に比べて無線通信の利用が望ましい場合や、光回線と無線通信を併用することで事業継続性の観点からより高い効果を得られる場合等において、固定無線回線が利用されている状況である。

他方、昨今の AI の進化に伴い、生成 AI や自動運転、サービスロボット、メタバースなど様々な技術の進展が見込まれ、今後は情報伝送量が爆発的に増加していくことが予想される。そうした中、その通信インフラのすべてを光回線でまかなうことは困難であり、固定無線による光回線の代替が期待される。

また周波数利用の観点では、現状、固定無線通信において、最も高い周波数帯としては 80GHz 帯が利用されているところ、移動通信システムの利用が進展し今後も周波数拡大の見込みであることから、固定無線通信について、より大容量通信が可能となる高い周波数帯の開拓が必要な状況である。最近では国際的にも、固定無線による 300GHz 帯の利用に向けた検討が始まりつつあり、高ミリ波帯(100～300GHz)の利用に対する期待は高まっていくと予想される。

一方、高ミリ波帯は指向性が高いことから、対向するアンテナとの軸ずれが発生しやすく安定性を確保することが困難であるほか、降雨等による減衰が大きいといった課題があり、実利用は困難な状況である。

そこで、高ミリ波帯を用いて、強風や降雨等の影響が想定される実運用環境下において、固定無線通信を安定的に実施可能にするために必要な技術について研究開発を実施する。実現すれば我が国が優位性を持って国際的な議論を進めることも期待される。

なお、高ミリ波帯固定無線通信は、移動通信システムの基幹通信網（フロントホール、バックホール）や、社会インフラ回線、大規模イベントの臨時回線、災害時臨時回線、自営の回線（ビル間通信等）、ラストワンマイルの回線など様々な利用シーンが想定される。本研究開発は、それらの利用シーンにおいて共通的に必要と考えられる技術の実現を中心に取り組むものである。

2. 政策的位置付け

- ・「統合イノベーション戦略 2024」（令和 6 年 6 月閣議決定）

「（1）先端科学技術の戦略的な推進」において、「2023 年 4 月に改訂した「デジタル田園都市国家インフラ整備計画」に基づき、データ流通や高度な AI の利用を支えるため、5G・光ファイバ等の整備、データセンターの分散立地、地域デジタル基盤の整備等を引き続き推進するとともに、オール光・非地上系ネットワー

ク等の Beyond 5G (6G) の早期実現に向け、研究開発・国際標準化・社会実装・海外展開の取組を一体的に推進する。」旨の記載あり。

3. 目標

本研究開発では、高ミリ波帯(100GHz~300GHz)^{※1}を用いた伝送距離最大1km、伝送速度100Gbps級の固定無線通信の実現を目指す^{※2}。具体的には、当該周波数帯の電波の直進性を活かして、4並列以上の無線通信回線を空間的に多重し、さらにそれらの無線通信が、強風や降雨等^{※3}の影響下であっても安定的、効率的に実施可能な固定無線通信技術の確立に取り組む。これにより、現在固定無線通信では利用されていない周波数帯の開拓を目指す。

※1 テラヘルツ帯(300GHz~)を対象に加えることを拒むものではない。

※2 降雨時など通信の接続性等の観点が発送容量に比べ優先される状況において、必ずしも、伝送距離最大1km、伝送速度100Gbps級の固定無線通信を実現することを求めるものではない。

※3 実運用環境下における車両の通行や地震による地面の振動も勘案することとする。

4. 研究開発内容

(1) 概要

現状、高ミリ波帯を用いた無線通信デバイスの開発が進展し、伝送実験が進められているものの、空間多重による大容量通信とともに、強風や降雨等の影響下であっても安定的、効率的な通信が可能となるシステムを実現し、実装することは技術的困難性が高く実現していない。

そのため、本研究開発においては、ハード面から「課題ア 無線リンク安定化技術」、システム面から「課題イ 高効率並列無線通信技術」の開発及び実証実験を実施する。

なお、本研究開発は、両技術を組み合わせることで効果を発揮するものであるとともに、強風や降雨等の影響が想定される屋外での実運用環境下において、安定的に利用可能にするために必要な技術の確立を目的とすることから、それらを踏まえて取り組む。

(2) 技術課題及び到達目標

技術課題

課題ア 無線リンク安定化技術

ア-1 高ミリ波帯 RF 技術

本課題では、高ミリ波帯において、4並列以上の無線リンクを空間的に多重させることに加え、周波数特性の異なる複数の周波数帯(基本とする一の周波数帯のほか、当該周波数帯に対し搬送波周波数が2倍以上となる周波数帯から構成される複数の周波数帯)で協調動作させて無線リンクを安定させることにより、伝送距離最大1km、伝送速度100Gbps級の通信を行うことが可能な、化合物半導体チップセットを基本要素とする高ミリ波帯 RF 技術を研究開発する。

また、本技術の実現においては、課題イの技術と連携して、アンテナ振動や降

雨減衰に対し、システムとしての冗長性を向上させることが重要である。そのため、課題イと連携して、並列する無線回線の受信電力や位相差などによるアンテナ方位のずれの検出や、小規模アレイアンテナや微少機械駆動などによる方位の自動微調を行う機構のほか、降雨減衰を補償する機構の実現に取り組む。

合わせて、本研究開発成果の普及を勘案し、小型化の観点からも研究開発に取り組むことが重要である。

なお、年間降雨不稼働率 0.01%を達成する降雨マージンを有する無線装置であることを前提とする。

アー 2 固定無線用指向性制御アンテナ

高ミリ波帯では、高利得アンテナを含む無線機筐体を機械駆動することによって、送受信間のアンテナ指向性を最適化する研究が注目されている。一方、従来のモータによる機械駆動では、指向性制御の応答速度と方向分解能が制限される。

屋外において気候状況は時々刻々と変化するものであり、その中で安定した固定無線通信の実施を可能とするためには、課題イの技術と連携して、応答速度が早く精緻に電子制御が可能なアンテナが必要になる。また、高い周波数の固定無線システムでの実用化を見据えると、アンテナの内部に指向性制御機能を有し小型化が可能なアンテナの開発が必要になる。

そのため本課題では、固定無線に適したアンテナ要件を明確化し、応答速度が早く、アンテナ方位を数度の範囲で可変できる高精度な指向性制御アンテナの研究開発を実施する。なお、成果の普及を勘案し、小型化の観点からも研究開発に取り組むことが重要である。なお、アンテナの周波数帯域は課題アー 1 で提案する複数帯域に対応させる。

課題イ 高効率並列無線通信技術

イー 1 ロバスト高密度空間多重技術

高ミリ波帯以上の周波数帯を利用した固定無線システムは、従来の固定無線よりも伝送容量は大きくなる一方、伝送距離は短くなる。そのため、相対的に無線機の設置数は増大する可能性が高く、普及には設置容易性が重要になる。

そのため本課題では、高い周波数で高利得アンテナを利用する際に課題となるアンテナビームの軸ズレ量を、複数の受信側機器の受信電力の解析結果から推定し、ビーム方向を探知する機能を開発する。加えて、それを踏まえて、課題アの技術と連携して、ビーム方向及びビーム幅を機械駆動及び電子制御のそれぞれのメリットに留意しバランスを確保したハイブリッド方式で自動調整するシステムを開発する。その際、並列するアンテナ間で相互に干渉することのないよう、必要に応じて影響の低減方策を実装する。なお、ビーム方向の探知とアンテナのビーム制御は一体で効果を発揮するものであり、実環境で最も効果的な組み合わせを探索していくことが重要である。

また、広い周波数帯域を利用するシステムにおいて通信容量を極大化するには、空間多重性を極限まで活用した多重方式の実現が必要となる。

これについては、空間多重に、偏波多重や周波数多重といった手法を一部併用

して稠密配置することで、効率的に伝送容量を最大化する技術を実現する。なお、他課題との連携により十分なリンクバジェットが得られることに留意し研究開発に取り組んでいくことが重要である。

イー２ 並列接続最適化技術

高ミリ波帯大容量固定無線システムの実現により、光ファイバネットワークの中で物理的に接続できない箇所を光ファイバネットワークの通信に影響を与えない形でネットワーク接続することが求められる。

光ファイバネットワークに遜色のない伝送容量や、同ネットワークにおいて高い可用性を実現するためには、複数の無線チャネルを並列化し統合した無線チャネルを構成する技術が必要である。一般的に無線システムにおいては、伝送容量と接続性はトレードオフの関係となる。そのため、複数無線チャネルの通信状況を適時把握し統合解析することで、適切な伝送容量を適切な接続性で実現するチャネル統合制御技術の実現が必要不可欠である。

本課題では、複数の無線チャネルについて、基本となる対向チャネル及び複数干渉チャネル情報を同時に計測・把握することで、複数無線チャネルの伝送容量・接続性などの統合リンク情報を１秒以内*に収集解析する技術を開発する。

また、当該統合リンク情報をテレメトリ情報としてサーバー等へ保存及び配信することで、ネットワーク側から無線区間も含めたネットワーク制御が可能となる。その際、上記の課題アの技術と連携して、統合リンク情報に基づき、安定した伝送容量もしくは接続性を実現させる等求められるサービスの要求レベルに応じて、変調方式等を含めて制御を行うことにより、最適化を行う技術を開発する。

* この数値は目安であり、システム全体として十分実用に耐えうる性能を満足する数値を別に設定できる場合はその数値による。以下、「*」を付した箇所において同じ。

イー３ 環境評価統合技術

高い周波数帯の利用において、降雨の状態を把握した上で他の無線局等との干渉が発生しない範囲で送信出力の調整を行うことにより、可用性を向上させることが期待される。このためには無線機器周辺の降雨状況を精緻に観測することが重要である。

本課題では、高ミリ波帯における降雨減衰発生時の環境変動を把握（観測）する手法を開発する。これにより、高い接続可能性の実現が期待される。

また、無線システム設置場所の周囲 500m から 1km 程度の範囲での降雨のミクロスケールな環境状況をリアルタイム観測することにより、課題アの技術と連携して、他の無線システムと自システムの与干渉・被干渉の条件を総合的に処理・判断し、最適な送信電力・占有周波数帯幅・変調方式を決定するアルゴリズムの開発を行う。更に他のシステムからの与干渉条件下において、スループットや接続断率など KPI の最大化・最小化が可能となる自律的な無線通信方式制御技術の開発にも取り組む。

イー4 インフラ向け超高信頼通信ネットワーク技術

一般に有線と比べて無線は電波干渉や降雨減衰等様々な要因により、接続性が阻害される。そのため、上記の課題アー1からイー3までの研究開発に取り組むことにより、高ミリ波帯固定無線通信の信頼性の向上を図ることとしている。

一方、高い接続性が求められるインフラに対し、高ミリ波帯固定無線通信を実装可能とするためには、無線部からネットワーク全体の通信に支障が生じないように、無線部、有線部を含むネットワーク全体での制御も重要である。例えば電力網に付随して設置されている通信ネットワークにおいては、現状の最も厳しい技術基準として、250km離れた地点を時間率99.99999%（セブンナイン）以上の高信頼性と、5ms以下の遅延時間での接続性がネットワークシステムとして求められている。

このため、高い接続性が求められるインフラ用に設けられたネットワークに広帯域無線伝送路が導入された時の設計手法の確立が重要になる。

本課題では、既設の光ファイバ伝送路に、広帯域無線によるバイパスやブリッジを付加する接続手法の開発を行い、実インフラ設備での利用を想定した環境での無線通信特性評価を行う。また、光ファイバと広帯域無線を用いたシームレスネットワークにおける回線切替時の通信特性評価や広域災害時を想定したネットワークの運用手法の検討を行い、それらを踏まえて、光ファイバと広帯域無線によるメッシュ型トポロジー通信ネットワークにおける回線設計の最適化技術の開発を行う。なお、その際、無線リンクの接続安定性の確保についても十分に留意すること。

到達目標

課題ア 無線リンク安定化技術

- ・ 4並列以上の無線リンクを可能とし、周波数特性の異なる複数の周波数帯で協調動作可能な化合物半導体装置を含む屋外設置可能な無線装置の実現
- ・ 回線距離最大1km、伝送速度100Gbps級の無線データ伝送の実現
- ・ 応答速度が早く、アンテナ利得を数度の範囲で可変できる高精度な指向性制御アンテナの実現

課題イ 高効率並列無線通信技術

- ・ アンテナビームの軸ズレ量を推定し、ビーム方向を探知するとともに、ビーム方向及びビーム幅を機械駆動及び電子制御のハイブリッド方式で自動調整するシステムの実現
- ・ 空間多重性を極限まで活用した大容量通信の実現
- ・ 複数の無線チャネル通信状況を適時把握するための統合チャネルテレメトリの実現
- ・ 統合リンク情報に基づき、求められるサービスの要求レベルに応じて、変調方式等を含め最適化を行う技術の実現
- ・ 降雨減衰発生時の無線品質維持のため、環境評価技術を確立し環境変動発生時

の高い接続可能性の実現

- ・高い接続性が求められるインフラ（光ファイバ網）に広帯域無線を追加した場合、ネットワークシステム全体で 250km*離れた地点間の 99.99999%以上*の信頼性と 5ms 以下*の遅延時間で接続可能な通信ネットワーク設計手法や最適化技術の確立

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。なお、提案する複数の周波数のうち低い周波数帯を【帯域 A】、高い周波数帯域を【帯域 B】と表記する。

<令和7年度>

課題ア 無線リンク安定化技術

アー1 高ミリ波帯 RF 技術

- ・【帯域 A】における集積化半導体素子のパラメータを抽出し集積化の検討
- ・【帯域 B】における MMIC の方式設計を行い、MMIC の一次試作の検討
- ・信号処理方式設計を行い一次試作回路の検討
- ・装置制御方式設計を行い一次試作回路の検討

アー2 固定無線用指向性制御アンテナ

- ・【帯域 A】の指向性制御システムの設計・試作（利得指向性 $\pm 3^{\circ}$ 以内*で可変）
- ・電磁界解析結果と実測した利得特性を比較評価し次年度の設計に向けた基本方針の検討

課題イ 高効率並列無線通信技術

イー1 ロバスト高密度空間多重技術

- ・稠密空間多重伝送システムの概念設計及び原理検証
- ・ビーム方向探知・制御基礎検討の実施

イー2 並列接続最適化技術

- ・単チャネル・複数干渉チャネル情報の収集・解析技術の設計及び基礎検証
- ・ネットワーク制御的手法による無線リソース最適化技術の概念設計とシミュレーション検証の実施

イー3 環境評価統合技術

- ・【帯域 A】・【帯域 B】におけるリアルタイム伝搬特性評価方式の提案及び設計

イー4 インフラ向け超高信頼通信ネットワーク技術

- ・電力や鉄道インフラ等で用いられている通信ネットワークの現状調査を実施し、ネットワーク構成を整理
- ・既設のインフラ用通信の光ファイバ線路に、長期的に屋外環境で利用する広帯域無線機を付加するための課題整理と接続手法の開発

<令和8年度>

課題ア 無線リンク安定化技術

アー１ 高ミリ波帯半導体装置技術

- ・【帯域 A】の MMIC を試作し性能評価
- ・【帯域 B】における集積化半導体素子のパラメータを抽出し集積化の検討
- ・【帯域 B】における MMIC の方式及び回路設計
- ・【帯域 B】における MMIC の試作し性能評価
- ・無線装置アンテナ方位粗調整機能の機能を試作し無線回線確立の検討
- ・無線装置アンテナ方位粗調整構造を試作し調整方法の検討
- ・方位粗調整構造及び制御回路との連動性の評価

アー２ 固定無線用指向性制御アンテナ

- ・【帯域 B】の指向性制御システムを設計・試作（利得指向性 $\pm 3^{\circ}$ 以内*で可変）
- ・電磁界解析結果と実測した利得特性を比較評価し次年度の設計に向けた基本方針の検討

課題イ 高効率並列無線通信技術

イー１ ロバスト高密度空間多重技術

- ・屋外を含む実環境データをもとにした空間多重伝送の設計・原理確認
- ・屋外でのビーム制御技術の設計・動作確認

イー２ 並列接続最適化技術

- ・10 秒以内*に収集・解析する統合チャネルテレメトリ技術の設計と原理検証を実施
- ・ネットワーク制御的手法による無線リソース最適化技術の設計と概念実装

イー３ 環境評価統合技術

- ・環境評価検証システムの基本試作及び動作確認・原理検証の実施
- ・無線・通信品質のモニタリング技術及び送信電力・帯域幅・変調方式等の適応制御技術の設計

イー４ インフラ向け超高信頼通信ネットワーク技術

- ・実環境での無線通信の特性把握のための試験場所の選定と光ファイバ回線確保、電源確保などを含めた測定環境整備
- ・通信特性や周囲環境の長期実験の測定系の構築
- ・6 ヶ月以上の無線通信特性評価の開始

<令和 9 年度>

課題ア 無線リンク安定化技術

アー１ 高ミリ波帯半導体装置技術

- ・【帯域 A】における集積化 MMIC の設計を行い試作性能の検討
- ・【帯域 A】における集積化 MMIC 試作し性能評価
- ・【帯域 B】における集積化 MMIC の設計及び試作を行い、性能評価
- ・無線装置アンテナ方位自動微調整機能の機能を試作し無線回線確立の検討
- ・無線装置アンテナ方位自動微調整機能の構造試作を行い調整方法の検討
- ・方位微調整構造及び制御回路との連動性評価

アー 2 固定無線用指向性制御アンテナ

- ・ R7 年度に試作した【帯域 A】の指向性制御型システムを改良し一次放射器の二次元駆動に対応する機構部の開発
- ・ 二次元走査時の利得指向性の評価方法確立

課題イ 高効率並列無線通信技術

イー 1 ロバスト高密度空間多重技術

- ・ 4 チャンネル以上の空間多重化の実現
- ・ 空間多重とビーム制御の同時動作の確認

イー 2 並列接続最適化技術

- ・ チャンネル情報解析とリソース最適化技術のシミュレータ実証
- ・ 無線フォーマット無依存化に向けたハードウェア抽象化とその検証

イー 3 環境評価統合技術

- ・ 実環境評価システムの試作
- ・ モニタリング技術及び適応評価技術の動作確認・原理検証

イー 4 インフラ向け超高信頼通信ネットワーク技術

- ・ R8 年度に引き続き長期の無線通信特性評価を行い品質評価とデータ分析
- ・ 光ファイバ断線を含む広域災害を想定し、平均修復時間 (MTTR) 等を考慮した通信ネットワークの機能の維持復旧のための運用手法の検討
- ・ 無線機本体の高信頼化の手法の整理

<令和 10 年度>

課題ア 無線リンク安定化技術

アー 1 高ミリ波帯半導体装置技術

- ・ 【帯域 A】における統合半導体無線モジュールを試作し性能評価
- ・ 【帯域 B】における統合半導体無線モジュールを試作し性能評価
- ・ 統合化パッケージ及び評価システムを製作し性能評価
- ・ 無線通信装置とシステム構成装置の試作し通信実験を行いサイトにおける伝送実験の検討
- ・ 屋外サイトにおける伝送実験を行い、屋外での通信性能評価

アー 2 固定無線用指向性制御アンテナ

- ・ 令和 9 年度までに開発したシステムを課題イで得られた成果と統合するための外部制御インターフェースを開発

課題イ 高効率並列無線通信技術

イー 1 ロバスト高密度空間多重技術

- ・ ビーム制御範囲 10 度*、精度 0.5 度以下*を実現
- ・ システム実証

イー 2 並列接続最適化技術

- ・ チャンネル情報解析とリソース最適化技術のシステム実証

イー 3 環境評価統合技術

- ・ リアルタイム伝搬特性評価方式と適応制御技術の統合
- ・ 全体システムの実証

イー 4 インフラ向け超高信頼通信ネットワーク技術

- ・回線設計のための広帯域無線回線の信頼度や遅延特性のモデル化
- ・光ファイバと広帯域無線によるメッシュ型トポロジー通信ネットワークにおける回線設計の最適化技術の開発
- ・インフラへの展開に向けた現場との連携推進

5. 実施期間

令和7年度から10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15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) 提案及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)＞

Ambient IoT システム高度化のための周波数有効利用技術に関する研究開発

1. 目的

920MHz 帯無線システムについて、我が国では、平成 17 年（2005 年）にパッシブ系システム、平成 20 年（2008 年）にアクティブ系システムの制度化を行って以来、これら無線システムについて着実に普及が進み、令和 6 年時点では約 7,000 万台が利用されているとみられ、令和 17 年（2035 年）には約 1 億 3000 万台以上まで普及すると予測されている。

アクティブ系システムとパッシブ系システムは利用する周波数帯が重複しているものの、キャリアセンスや送信時間制限といった混信回避機能によって、これまで同帯域において共用を実現してきた。しかしながら、将来的に更なる普及が進んだ場合、同一空間内に存在する無線局数が増加し、通信品質の低下や通信の途絶等が生じるおそれがあるため、これらシステムについて周波数利用効率の向上が求められているところである。

パッシブ系システムはバックスキッタ通信（後方散乱通信）方式を利用した双方向無線通信を行う。これは、質問器が端末に対して無線で給電しながらデジタル信号を送信し、端末はアンテナ反射率を変化させることで、端末から質問器へデジタル信号を送り返す仕組みである。RFID（Radio Frequency Identification）は、従前では電池レス端末からの個体識別子収集が主要な用途だったが、最近では個体識別に加えてセンシング機能やストリーミング機能などが実装され、電池レスセンサ端末を実現する手段として注目されている（なお、センサ端末は、接点制御などのアクチュエーション機能を有する端末も含意している。）。関連する動きとして、周囲に存在する環境エネルギーを取り込み電力源とする Ambient IoT システムが注目されており、諸外国や国際標準化団体において検討・議論がなされている中で、放送、Wi-Fi、5G などの用途で送信されている電波に対してバックスキッタ通信方式を適用することで、様々な IoT デバイスからデータを収集するシステムの検討が進められているところである。

バックスキッタ信号は極めて微弱であり、他のパッシブ系質問器やアクティブ系システムと周波数共用することは極めて困難である。そこで、920MHz 帯ではバックスキッタ信号の保護を考慮してチャンネル運用されている。利用できるチャンネル数が限られているため、アクティブ系システムを含めた 920MHz 帯無線システム全体の無線局数の増加に伴う重複周波数帯の輻輳による影響が大きく、限られた周波数の有効利用が一層求められる。また電池レス通信を実現するためには、センサ端末の移動や空間的に広がるセンサ端末に対して安定的に無線給電する必要がある。920MHz 帯パッシブ系システムではバックスキッタ信号を保護するチャンネルが存在せず被干渉の少ないチャンネルを選択して運用する必要があるため、周波数有効利用がより必要となる。

しかしながら、バックスキヤッタ通信方式において、センサ端末は原理的に特定の周波数チャンネルに対する相対周波数を反射することしかできないという特性があり、①複数の質問器と複数のセンサ端末が存在する環境においては、その位置関係や密度等（質問器やセンサ端末が移動している場合は移動速度も含む）によって、大容量通信が困難である／混信が発生してしまう、②センサ端末側は質問器からの供給電力の一部を反射するのみであるため、その位置関係や密度等によっては、質問器側で受信する信号品質が劣化してしまい、所望のデータレートが実現できない、③移動するセンサ端末や、空間的に広がって配置されたセンサ端末に安定的に無線給電することができない等の課題がある。

そこで、本研究開発においては、①バックスキヤッタ通信に係る分散アンテナ協調制御技術、②バックスキヤッタ通信に係る空間分割多重技術、③センサ端末回路アーキテクチャ等高度化技術の開発を行うことで、前述の課題を解消し、周波数の繰り返し利用等により周波数利用効率の向上を実現する。

2. 政策的位置付け

- ・デジタルビジネス拡大に向けた電波政策懇談会 報告書 WX(ワイヤレストランスフォーメーション)推進戦略（令和6年8月）

「第2章 ワイヤレス新時代の実現と目標設定」において、「工場において、産業機械のワイヤレス化が進むことで、リアルタイムでの遠隔操作・メンテナンスや無人搬送車などによる全自動処理が可能となる。また、産業機械のレイアウト変更に伴う配線コストも軽減され、製造ラインの柔軟化が進む。これにより、人手不足に直面する製造現場におけるニーズへの即応性の向上、効率化、省人化・無人化が進み、生産性、創造性が大幅に増加する。」「ドローンやIoTセンサ、自動運転による自動点検や遠隔保守による省人化や効率化が進むことでインフラの維持コストが軽減され、人口減少時代において人手不足や利用者の減少により維持が危ぶまれるインフラについても維持・管理が可能となる。これにより人口減少地域においてもインフラの維持が可能となる。」旨が記載されている。

また、「第3章 デジタルビジネス拡大に向けた電波有効利用方策」において「インフラ監視、環境モニタリング、物流管理等の用途でIoTの利用が拡大しており、広範囲に位置するセンサ等から効率的に電波を受信する仕組みの構築が期待されている。」旨が記載されている。

- ・経済財政運営と改革の基本方針 2024（令和6年6月21日閣議決定）

「第1章 2. 豊かさと幸せを実感できる持続可能な経済社会に向けて」において、「2050年にかけて、都市部では高齢人口が増加する一方、地方部では人口減少が深刻化するなど、人口動態の変化の現れ方は自治体や地域ごとに異なる。また、老朽化により更新時期を迎えるインフラ・公共施設が一斉に増加するとともに、人口減少の更なる進展に伴って、担い手不足や一人当たりでみた公共サービス維持のコスト増が顕在化し、個々の自治体だけでは持続可能性を確保できない地域も出現

する可能性がある。(中略) 公共サービスやインフラ維持管理の広域化・共同化を進めるとともに、DXや新技術の社会実装により地域機能やサービスの高度化を図り、新しい生活スタイルへ移行させていく。」旨が記載されている。

また、「第3章 2 (4) 戦略的な社会資本整備」において、「広域的・戦略的なインフラマネジメントの実施、AI等の新技術の活用、事業者間や官民の連携促進等により、予防保全型メンテナンスへの本格転換や維持管理の高度化・効率化、公的ストック適正化を推進する。」旨が記載されている。

・国土強靱化基本計画（令和5年7月28日閣議決定）

「第1章 4 国土強靱化政策の展開方向」において、「予防保全型メンテナンスへの本格転換など防災インフラ施設の老朽化対策」として、「施設に不具合が生じてから対策を行う「事後保全型」から、損傷が軽微な早期段階での手当てによって施設を長寿命化させる「予防保全型」への本格転換によりライフサイクルコストの低減を図るとともに、市区町村界にとらわれない広域的な観点から、複数の分野のインフラを群として捉え、官民連携や新技術・デジタルの活用によりメンテナンスを効率化・高度化するなど、広域的・戦略的なインフラマネジメントを進める。」旨が記載されている。

また、「第3章 2 施策分野ごとの国土強靱化の推進方針」において、「高度成長期以降に集中的に整備された道路・鉄道・港湾・空港・工業用水道等の基盤施設や、上下水道・公園・学校等の生活基盤、農業水利施設・漁港等の食料生産・供給基盤、治山治水・林道・海岸保全施設等の国土保全基盤といった各種のインフラが今後一斉に老朽化することを踏まえ、人命を守り、必要な行政・経済社会システムが機能不全に陥らないようにする観点から、予防保全型のインフラの維持管理に転換し、中長期的なトータルコストの縮減・平準化を図りつつ、インフラの維持管理・更新、集約・再編を確実に実施する。」「ドローンやAI、IoTを活用したリモートセンシングや、レーダーやセンサを利用し、検査対象物を破壊することなく内部の状態を把握する技術等を積極的に活用するとともに、点検・補修データの利活用などDXを進めることにより、インフラの維持管理や更新を効率的に対応できるような実施体制の構築を図る。」旨が記載されている。

3. 目標

本研究開発では「2. 政策的位置付け」で示したWX、DX、国土強靱化の実現に向けて重要となる「電池レスセンサ端末」を用いる無線システムの高度化を目指す。具体的には、920MHz帯パッシブ系システムとして幅広く活用されているRFIDシステムのバックスキャッタ通信技術について、①バックスキャッタ通信に係る分散アンテナ協調制御技術、②バックスキャッタ通信に係る空間分割多重技術、③センサ端末回路アーキテクチャ等高度化技術の開発を行うことで、周波数の繰り返し利用等を可能とし、周波数利用効率の向上を目指す。

また、上記の技術は、当該システムの電池レスという特徴を生かし、低炭素社会

の実現に向けた予知保全による産業生産性向上やインフラ長寿命化等のあらゆるシーンへの適用が期待されることから、これらに代表するユースケース等を想定した環境において、周波数利用効率が4倍以上向上していることを確認する。

4. 研究開発内容

(1) 概要

バックスキッタ通信におけるセンサ端末は、原理的に、質問器等から出力される電波に対する特定の相対周波数を反射することしかできない。また、これらのセンサ端末にはバッテリーが搭載されないことが一般的であり、センサ端末を極めて低消費電力で動作させる必要があるため、高安定なクロック生成や高度な変調処理による占有周波数チャネルの高密度配置は困難である。

上記の制約から、現行のバックスキッタ通信技術については、混信回避のため時間軸での衝突回避あるいは複数の周波数チャネルが必要となり周波数利用効率が低い、他の質問器への妨害波による混信や信号品質の劣化が発生する、二値変調のため通信容量が小さい、センサ端末回路の発振周波数などの特性が安定しないため複数サブキャリアによる多重化が困難といった課題がある。これらの課題に対応するため、

ア バックスキッタ通信に係る分散アンテナ協調制御技術、

イ バックスキッタ通信に係る空間分割多重技術

ウ センサ端末回路アーキテクチャ等高度化技術

に関する研究開発を実施し、前述の課題の解消を確認するとともに、周波数の繰り返し利用等によって周波数利用効率4倍以上を達成することを目指す。具体的には、分散アンテナシステムの利用により受電電力を4倍程度向上させ、SNRを向上させることで、多値変調を実現し、これにより2倍程度の周波数利用効率向上を目指す。さらに、クロック安定化によりバックスキッタ信号のより稠密なチャネル配置を実現し、単位周波数当たりの伝送情報量を2倍程度向上させる。これらを組み合わせることにより、周波数利用効率4倍以上を達成することを目指す。

特に機械装置の点検・監視やインフラの予知保全などに応用するためには、カバレージを拡げながらも、質問器からの電力をセンサ位置に動的に効率良く集める必要がある。これは通信品質を向上させることに加えて、質問器から他の無線システムに対する電波干渉を軽減する効果も期待できる。地理的に近い空間で同じ周波数帯域を4回以上繰り返し利用することができれば、利用が想定される工場内における数百台の機械設備の動作監視のシナリオについて920MHz帯を用いて応えることができる。

(2) 技術課題および到達目標

技術課題

ア バックスキッタ通信に係る分散アンテナ協調制御技術

複数のセンサ端末に安定して電力を供給しつつ、独立した信号で下り通信を行うためには、複数の質問器を連携させ、周波数や位相等を高精度に制御する分散アンテナ技術により、通信ゾーンを各センサ端末の位置に形成する必要がある。これにより通信路を独立に形成することで、通信の多重化が可能となる。また、分散アンテナを用いて、同時に送信を行うことにより、センサ端末における無線受電電力を大幅に改善することができる。さらに、不要な領域への電波送信について、ゾーン形成により抑制し、同一周波数帯を使用する他のシステムに対する電波干渉を軽減することが可能となる。分散アンテナの協調制御により周波数を効率的に繰り返し利用するためには、空間的に離れて設置された質問器間の高精度な周波数同期と、センサ端末において同位相で信号が受信されるように送信を行う位相等制御技術が必要となる。加えて、質問器のアンテナは分散して配置され、それぞれから最適な指向性で電波を送受信する必要がある。以上のような分散アンテナ協調制御を実現するため、以下の研究開発を実施する。

(a) 分散配置した質問器の同期協調制御

複数の離隔設置されたアンテナ（分散アンテナ）において、無線あるいは簡易な有線接続を用いて周波数が相互に高精度に一致するよう調整する周波数同期技術および位相等制御技術を確立する。

(b) 分散アンテナ協調制御のための位相等最適化技術

各センサ端末における合成信号の振幅等の情報を取得した上で、各質問器から各センサ端末に到達する電波の位相等を質問器側で推定することで、複数のセンサ端末に対する複数質問器の送信位相等の最適制御に繋げる位相等最適化技術を確立する。

(c) 分散アンテナ技術

質問器およびセンサ端末における各アンテナについて、分散アンテナシステムに最適な指向性と均一な電波送受信特性を有し、高放射効率で占有寸法の小さいアンテナを設計する。

イ バックスキャッタ通信に係る空間分割多重技術

複数の質問器と複数のセンサ端末間の通信における周波数利用効率 4 倍以上を達成するためには、バックスキャッタ通信のフォワード回線（質問器からセンサ端末への通信回線）における周波数の繰り返し利用だけでなく、リターン回線（センサ端末から質問器への通信回線）における混信や信号品質劣化も課題となる。またバックスキャッタ通信では、センサ端末からセンサ端末への通信が原理的に困難であるため、センサ端末同士で時間同期しての多元接続方式による周波数利用効率の向上が困難であるという課題がある。加えて、バックスキャッタ通信において、質問器はキャリア信号を送信しながら受信も行うため、質問器での受信時には自身の送信したキャリア信号をキャンセルする必要があるが、分散アンテナを用いる場合においては、自身のキャリアに加えて他の質問器の合成キャリアについてもキャンセルする必要がある。さらに、リターン回線の通

信容量を向上させるためには、多値変調に対応し、単位周波数あたりの伝送情報量を向上させる必要がある。このために以下の研究開発を実施する。

(a) 複数の質問器における受信信号の合成・干渉除去

フォワード回線を保持しつつ、複数の質問器において特定のセンサ端末からの信号を同時に受信し、合成信号処理を行うことで、所望のセンサ端末の信号強度の強化と雑音の低減を行い、信号品質を向上するとともに、複数の質問器間で連携することに伴い発生する自質問器及び他質問器から送信されるキャリア信号等によるリターン回線への干渉を防ぎ、バックスキッタ信号品質を改善する技術を確立する。

(b) 高効率多元接続方式

バックスキッタ信号を時間軸あるいは周波数軸上で効率良く配置可能な多元接続方式を確立する。

(c) 適応変復調バックスキッタ通信方式

フォワード回線において、回線品質に適合した変復調方式等を質問器がセンサ端末に対して割り付けるとともに、リターン回線において、多値変調に対応したサブキャリア信号の受信信号処理技術を確立する。

ウ センサ端末回路アーキテクチャ等高度化技術

複数の質問器と複数のセンサ端末が存在する環境において周波数の有効利用を実現するためには、複数サブキャリアを用いた伝送路多重化の実現が必要となる。安定した通信を行うためには、安定した発振周波数が必要となるが、センサ端末の発振回路については、無線電力供給の不安定性に加え、質問器との距離が離れるほど供給電力が限られるといった問題があるため、高精度かつ安定した発振と低消費電力を同時に実現することが必要となる。また、リターン回線の通信容量を向上させるために多値変調に対応し単位周波数あたりの伝送情報量を向上させる必要がある。このために以下の研究開発を実施する。

(a) バックスキッタ通信における安定化端末回路技術

実電波伝搬環境において無線給電電力が不安定な状況であっても、センサへの給電能力や発振周波数などのセンサ端末の性能を安定させる回路技術を開発する。

(b) バックスキッタ適応変調回路技術

質問器からのコマンドによってバックスキッタ通信のリターン回線の変調方式を選択的に変更できる変調回路技術を開発する。

到達目標

ア バックスキッタ通信に係る分散アンテナ協調制御技術

所望のセンサ端末あるいはセンサ端末群への無線電力を効率的に供給するとともに、不要な干渉電力を抑圧する、分散アンテナ協調制御技術を確立する。所望のセンサ端末において、受電電力を4倍(6dB)以上に向上し、干渉電力については

分散アンテナ協調制御技術を使用しなかった場合と比べ $1/2$ (-3dB) 以下にすることを旨とする。これらの目標を達成するため、要素技術に関して下記の目標を達成する。

- (a) 分散配置した質問器の同期協調制御
 - ・周波数同期制御により、送信周波数を偏差 10Hz 以内に同期する。
 - ・位相制御により、位相を 5.7 度以内の分解能で制御する。
- (b) 分散アンテナ協調制御のための位相等最適化技術
 - ・シミュレーションによる理想的な位相設定時と比較して、受信電力が -1.5dB (約 70%) 以上となる精度で、振幅ベースの位相推定による位相の最適化を行う。
- (c) 分散アンテナ技術
 - ・分散アンテナシステムに最適な指向性を持つ、小形かつ広帯域な、50% 以上の効率を有するアンテナを開発する。

イ バックスキャッタ通信に係る空間分割多重技術

- (a) 複数の質問器における受信信号の合成・干渉除去
 - ・複数質問器で受信したバックスキャッタ信号を合成して信号品質を改善する信号処理法を確立する。
 - ・バックスキャッタ通信のリターン回線において大きな干渉源となる、質問器からセンサ端末に送信される際に当該質問器自身へ漏れ込むキャリア信号等及び他の質問器から送信され合成されて受信されるキャリア信号等について、質問器において 1000msec 以内に除去する回路を開発する。
- (b) 高効率多元接続方式
 - ・質問器から特定の信号を送ること等により、センサ端末のクロックを安定化させ、バックスキャッタ信号の周波数変動を抑圧することで、より稠密な周波数配置および時分割通信等に資する時間同期を可能とする通信方式を開発する。
- (c) 適応変復調バックスキャッタ通信方式
 - ・多値変調バックスキャッタと従来型の符号化バックスキャッタを質問器からのコマンドで動的に制御する通信プロトコル及び通信フレーム構造を開発する。
 - ・バックスキャッタ信号がセンサ端末毎に二値変調・多値変調および複数の符号化を適応的に用いる際、その変調符号化方式に動的に対応可能な質問器側の復調・復号信号処理回路を開発する。

ウ センサ端末回路アーキテクチャ等高度化技術

- (a) バックスキャッタ通信における安定化端末回路技術
 - ・サブキャリア間の干渉抑制と安定した伝送路多重化の実現に資するため、発振回路構成や周波数キャリブレーション技術を適用し、消費電力の増大を抑え

ながら、発振周波数の精度を現状の数%から1%以下に高精度化する。センサ端末は受信電力-15dBmでセンサ駆動できることを目標とする。

(b) バックスキャッタ適応変調回路技術

- ・センサ端末側において電池レスかつ多値変調に対応可能な回路構成を確立することで、単位周波数当たりの伝送情報を増やし、周波数利用効率2倍以上を目指す。

課題ア、イ、ウを連携して研究開発することで、センサ端末の受信電力の最大4倍増大や、カバレッジを柔軟に拡大する機能を具備しつつ、単位周波数当たりの伝送情報量を2倍以上にするとともに、多元接続におけるチャネル密度の向上、単位チャネルの通信品質向上によるパケットエラーの低減による実質伝送情報量の増大を実現し、本件技術の主な適用先を想定した実証環境（100台規模のセンサ端末と10台規模の質問器）において、全体目標である「バックスキャッタ通信に係る周波数利用効率を4倍以上向上」の達成を確認する。

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。

<令和7年度>

ア 分散アンテナ協調制御技術

- ・センサ端末との通信部と分散アンテナ位相等制御装置を組み合わせたゾーン形成に関して、シミュレーションおよび部分試作による基礎検討を実施
- ・分散アンテナ間においてキャリア周波数を同期させる手法の基礎検討の実施
- ・小形広帯域アンテナの設計

イ バックスキャッタ通信に係る空間分割多重技術

下記の要素回路の試作、シミュレーションにより目標を達成しうる要素技術を選定する。具体的には下記を想定する。

- ・受信信号の合成・干渉除去に関する方式検討、シミュレーション
- ・多値変調バックスキャッタの復調に関する方式検討、シミュレーション

ウ センサ端末回路アーキテクチャ等高度化技術

- ・基本回路の方式検討およびシミュレーション等による基本性能確認

<令和8年度>

ア 分散アンテナ協調制御技術

- ・分散アンテナを用いたゾーン形成回路に関する試作評価
- ・キャリア周波数同期回路に関する試作評価

イ バックスキャッタ通信に係る空間分割多重技術

- ・リアルタイム干渉除去回路の試作と評価
- ・高密度バックスキャッタ多元接続方式の要素回路試作と評価
- ・適応変復調バックスキャッタ通信回路の試作と評価

ウ センサ端末回路アーキテクチャ等高度化技術

- ・令和7年度の設計に基づいた第一次試作品製造および性能評価の実施と、評価結果を反映した第二次試作品設計

<令和9年度>

各開発項目について以下に述べる開発・評価を行うとともに、最終的に100台規模のセンサ端末と10台規模の質問器を用いた統合実証実験を実施し、周波数利用効率向上や柔軟なカバレッジ設計性能を確認する。

ア 分散アンテナ協調制御技術

- ・ゾーン形成要素回路およびキャリア周波数同期要素回路と、空間分割多重システムの統合

イ バックスキャッタ通信に係る空間分割多重技術

- ・a, b, cの技術要素をアの開発に取り込んだ質問器の試作と性能評価
- ・実証実験による開発技術の有効性の確認

ウ センサ端末回路アーキテクチャ等高度化技術

- ・第二次試作品を用いたセンサ端末製造・評価

5. 実施期間

令和7年度から9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」及び令和15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。