

＜基本計画書＞

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ャッタ通信（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ャ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。

バックスキャ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 帯ではバックスキャ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ャ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。