

<基本計画書>

同期・多数接続信号処理を可能とするバックスキヤッタ通信技術の研究開発

1. 目的

産業機械や土木構造物などの人工物の加速度・変位に代表される機械的状态を、無線通信を用いて自動検知し、さらにデータ分析による予知保全を実現することは、中長期的な人手不足の中で、人工物の故障や不具合による損失を未然に防止し、社会の安心・安全を確保するために重要である。この分野は構造健全性診断と呼ばれ、現在多くの場合は人工物の運用を一旦停止し、有線センサを多数取り付けし、試験・点検を行っている。このため試験実施に多くの労務が必要であり、また試験・点検のための運用停止コストも必要となる。このため、高い頻度で試験を行うことが困難なことから、故障や不具合の予知・予測精度も低くならざるを得ない状況となっている。

無線センサ、特にバッテリーレス（電池不要）センサを用いて構造健全性診断ができれば、配線に関する労務を大幅に払拭でき、また人工物運用中にも試験・点検を行え、取得データ数を飛躍的に増大できる可能性があり、それを用いた予知保全につなげることもできる。人工物の機械的状态を無線通信で検知するためには、比較的低速の無線チャネルを多数同期通信させることが必要とされており、かつ、人工物への埋め込みや取り付けのため、端末のバッテリーレス動作が強く望まれている。

バックスキヤッタ (Backscatter/後方散乱) 通信とは、リーダライタ (読み取り装置) からの変調波によってフォワード回線を構成するとともに、リーダライタが発する給電波に対して少なくとも二値に反射率を変えることのできる端末を用い、電波の反射によってリターン回線を作り出す無線通信方式である。バックスキヤッタ通信システムは電子タグシステムを中心に現在 920MHz 帯が使われており、電池不要あるいは超低消費電力の超小型端末との双方向の通信を実現できるため、元来通信機能を有さない人工物との通信・センシングに大変有効である。

一方、バックスキヤッタ通信システムで多数の端末からの同時センシングを限定的な帯域幅 (3.6MHz¹) で安定して実現するためには、センサタグの帯域外輻射による高調波干渉や、隣接するリーダライタによる意図しないバックスキヤッタによる干渉への対策が必要なことに加え、広範囲の同期通信を可能とするため、複数のリーダライタを用い、周波数資源を再利用しながら覆域を拡大し、相互干渉なく利活用することが課題となっている。

本研究開発は、100 台程度のバックスキヤッタ通信端末とリーダライタ間の上り回

¹ 長距離バックスキヤッタ通信に適した 1W 空中線電力のリーダライタがアクティブ RFID システムなどと干渉することがない 916.8, 918.0, 919.2MHz の 3 キャリアを用いた場合の帯域幅

線の同期かつ安定的な伝送技術、移動バックスキヤッタ通信技術、多数の端末と複数リーダライタの利用を可能とする通信制御技術を確立し、上り回線周波数チャネルの稠密配置、重畳利用および繰返し利用を実現することで、920MHz 帯の周波数の更なる有効利用を促進することを目的とする。

2. 政策的位置付け

■未来投資戦略 2018（平成 30 年 6 月 15 日 閣議決定）

3. 「Society 5.0」の実現に向けて今後取り組む重点分野と、変革の牽引力となる「フラッグシップ・プロジェクト」

(3) 「行政」「インフラ」関連プロジェクト

・次世代インフラ・メンテナンス・システムの構築

急速に進展しているインフラの老朽化と中長期的な人手不足に対応し、安全・安心と生産性向上を支えるインフラを適切に管理して良好な資産として次世代に引き継ぐため、徹底したデータ活用とロボット・センサーなどの新技術の開発・導入により、インフラメンテナンスの生産性向上とコスト効率化を大幅に進める。

■電波政策 2020 懇談会（平成 28 年 7 月）

3. 新たなモバイルサービスの実現に向けた検討

(3) モバイルサービスの将来展望と具体的方策

・ワイヤレス IoT・プロジェクト

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。

多様な無線環境を含む IoT システム全体を最適に制御して周波数の有効利用を図る技術等の研究開発を実施。

■国土強靱化基本計画ー強くて、しなやかなニッポンへー（平成 30 年 12 月 14 日）

第 3 章 国土強靱化の推進方針

施策分野ごとの国土強靱化の推進方針

(横断的分野の推進方針)

(E) 研究開発

- 教育・研究機関、民間事業者において優れた人材を育成するとともに、研究開発・技術開発に対するインセンティブを導入して、先端技術の導入促進を進め、国土強靱化に係るイノベーションを推進するとともに、大規模自然災害に対する国・地方公共団体・民間など関係機関の災害対応力の強化等のため、優れた技術や最新の科学技術を活用することで、防災・減災及びインフラの老朽化対策における研究開発・普及・社会実装を推進する。【内閣府（科技）、関係府省庁】

3. 目標

バックスキヤッタ通信は端末に給電しながら無線通信を行うため、現在制度化されている1W 空中線電力のリーダライタを用いても通信距離が10m程度と短く、反射を利用する上り回線は被干渉に脆弱である。さらに、原理的に反射電波の電力や帯域外輻射を制御できないため、端末の多元接続方式の多くは、時間軸での多重化を用いている。このため複数端末からの上り回線の同期通信は実現できていない。つまり現状、バックスキヤッタ通信で同時通信できる端末数は1つの質問器に対して1つのみである。

なお、時分割多元接続方式により複数の端末と通信を行う場合、端末間の精緻な時刻同期と高速送信によって同時通信に近い状況を作り出しているが、多数の端末による同期通信への対応には高精度な時刻同期やサンプリングレートの高速度化等が必要であり、また、高精度クロックやバースト送信のためのバッファ制御に大きな電力を要するため、本研究開発で想定しているバックスキヤッタ通信には不向きである。

人工物の保守点検における産業的要求条件として、同時通信可能なセンサ端末は100台程度が想定されており、このような多数の端末からの無線通信が同期かつ時間連続（ストリーミング）で行えるようになれば、振動状態の観測による人工物の構造的不具合・故障診断や、産業ロボットなどの機構制御が電池不要端末で実現でき、通信機能を元来有さない人工物の状態を遠隔で容易に観測・制御できるようになる。また、端末が超小型かつ電池不要であることは、配線や電池交換コスト低減のみならず、センサ端末自体や接続に必要なケーブルの重さなどによる試験精度の劣化防止や宇宙環境など厳しい環境下での電池爆発などの危険回避の面からも望ましい。さらにリーダライタや端末が移動可能になれば、移動する人工物の点検・観測や移動しながらの観測も可能となる。

本研究開発では、上述の社会的期待に応えるため、広範囲かつ多数のセンサからの同期多元接続通信を可能とするバックスキヤッタ通信の変復調技術及び同期ストリーミングを実現するための割当てチャンネルの最適化、通信制御方式及び複数のリーダライタの同期による覆域結合を可能とする信号処理技術等の開発・検証を行い、センサ端末からの応答波1チャンネルの同時利用端末数を平均で2台以上とすることで周波数利用効率を2倍以上とすることを目指す。なお、1つのセンサ端末が選択可能な応答波チャンネルは30チャンネル程度とすることを前提とする。

具体的な目標は、以下のとおり。

項目	目標
バックスキヤッタ通信における同期ストリーミング通信の実現	920MHz帯(3.6MHz帯域幅)において、センササンプリング周波数100Hzで100ch以上あるいはサンプリング周波数1kHzで30ch以上の通信をバッテリーレス端末により、同期誤差をサンプリング周期の1%以下で実現。

バックスキヤッタセンサ感度	加速度センサ装備のバッテリーレスセンサで人工物の材質等に関わらず-15dBm 以上を実現。
移動バックスキヤッタ通信方式の実現	リーダライタあるいは人工物に取り付けたバックスキヤッタ端末群が 55km/h 以上で移動した状態でも同期ストリーミングを実現。
同期バックスキヤッタ通信における通信制御方式	多数のバックスキヤッタ通信端末に対して、周波数利用効率を損なうことなく、上り回線のチャンネル割り当て、ストリーミング通信の開始・停止を制御する通信プロトコルを実現。
周波数を有効利用するバックスキヤッタ通信覆域の柔軟な拡大	複数のリーダライタの同期による覆域間相互干渉を除去する信号処理技術等により、複数のリーダライタを用いてバックスキヤッタ通信覆域を柔軟に設計することで、周波数チャンネルの同時利用を可能とし、2倍以上の周波数利用効率を実現。

なお、本研究開発においては、センサ端末の無線部分（RFIC）の開発を対象としており、センサの種類が異なっても RFIC の要求仕様は基本的に変わらないため、振動検知など産業用途における流用性の高い加速度センサを用いることを前提とする。

4. 研究開発内容

(1) 概要

3章の目標を達成し、限られた周波数帯で多数のバッテリーレス端末からの同期通信を実現するために必要な、バックスキヤッタ通信における同期多元接続方式及び多数端末の通信制御方式に関する研究開発を行い、920MHz 帯における高効率な周波数利用技術の確立を図る。

(2) 技術課題および到達目標

技術課題

バックスキヤッタ通信は、端末側での帯域外輻射抑圧や反射電力制御ができないため、従来は時間スロットを用いた時分割多元接続が主流であり、多チャンネル同期通信は実現できていない。また、超小型端末をバッテリーレスで動作させチャンネルを多数確保するためには、端末の周波数安定度が確保できないことや、リーダライタ送信器などの電波源から受信機への給電波の漏れ込みおよび反射による位相雑音の軽減についても考慮する必要がある。加えて、自動車走行時の多地点

センシングや、リーダライタの自動車やドローンなどへの搭載による人工物のセンシングを行うためには、リーダライタやセンサが移動する伝搬環境におけるバックスキャッタ通信に対応する変復調技術が必要となる。

また、多数のセンサ端末による同期ストリーミング通信を行うためには、端末の識別子を短時間で効率的に呼び出すインベントリ（マルチリード）機能や端末を1つ1つ指定しながらメモリへの読み出し・書き込みを行うアクセス機能に加えて、センサ端末からの応答波チャネルの適切な割り当て、同期ストリーミングのための通信制御技術の開発が必要となる。さらに、大型あるいは複雑な形状の人工物の状態を検知する際は、人工物内に広範囲に散在する多数のセンサ端末の読み取りのため、異なるキャリア周波数を用いる複数リーダライタあるいは複数の受信アンテナによって複数の読み取りゾーン（覆域）を構成し、覆域を相互に補完する必要がある。

以上を踏まえ、本研究開発では、表1に示す産業的要求仕様を想定し、移動時も含め、サンプリング周期の数%程度の同期精度を実現できる同期多元接続によるストリーミング通信の実現のため、以下の技術を確立することで、複数のリーダライタの同期による覆域の結合や、複数のバックスキャッタ端末による同一周波数チャネルの同時利用により、周波数利用効率を2倍以上とする。

- ・ 移動時（55km/h 以上）を含めた高精度同期多元接続方式
- ・ 高感度バックスキャッタセンサ
- ・ バックスキャッタ通信による同期多元ストリーミング通信を実現する通信プロトコル
- ・ 複数のリーダライタの同期による覆域の結合、相互補完を実現する信号処理技術

表1 人工物の保守点検における同期無線センシングへの産業的要求仕様

分野	端末取付箇所	サンプリング周波数	同期通信チャネル数	保守点検等目的・用途
自動車	タイヤ、車体、バネ、チャイルドシート	500Hz～20kHz	～64ch	タイヤ内部・車両走行時車両挙動の把握/衝突時のチャイルドシートの挙動試験
インフラ	構造物・橋梁	100Hz～500Hz	～100ch	振動時の多点加速度・ひずみ試験変位（たわみ）、振動、ひずみ（亀裂）の把握
機械・プラント	設備機械	100～200Hz	～10ch	エラー時の現象（ひずみ・振動・圧力・温度）把握
建設機械	建機	1～15kHz	～32ch	建機の挙動把握
鉄道	台車	1～2kHz	数 10ch	鉄道台車の振動・ひずみ・温度測定の挙動把握

人間工学	人体	100Hz~1kHz	~10ch	スポーツ、リハビリ時の各箇所 の挙動把握
航空宇宙	機体・ミッション機 器など	100Hz~15kHz	100ch 以上	ひずみセンシング、モーダル 試験、音響試験

なお、バッテリーレスセンサの感度は、多くの利用が見込まれる MEMS 加速度センサを搭載した場合において、4W EIRP のリーダの正対方向で 10m の離隔距離を達成できる性能として、-15dBm を前提とし、この感度を取り付けあるいは植え込み対象人工物の材質や形状などに関わらず達成するアンテナ設計・タグ取り付け実装技術を LSI 開発により実現する（ただし金属に囲われた内部や水中など 920MHz を利用した場合、通信が困難で非現実的となる人工物や使用環境は除外してよい。）

また、移動時の速度は、典型的な移動用途である自動車衝突センシングの基準である 55km/h 以上を前提とする。

到達目標

上記の課題を達成するため、以下を目標とする。

- a. 920MHz で連続送信可能である 3 キャリア (3.6MHz 帯域幅) を用いて 100Hz サンプリングレート 100ch、設定を切り替えることで 1kHz サンプリングレート 30ch 以上の加速度センサを用いた同期多元接続方式をサンプリング周期の 1% 以内の同期誤差 (物理層) で実現。
- b. 取り付けあるいは植え込み対象人工物の材質や形状などに関わらず、加速度センサ装備のバッテリーレスセンサを感度-15dBm で実現。
- c. 移動利用の場合、速度 55km/h 以上で移動するバックスキヤッタ端末群あるいは移動リーダライタで同期データストリーミングを実現。
- d. バックスキヤッタ通信において、インベントリ機能、アクセス機能、チャンネル割り当て機能、ストリーミング制御機能、移動時にも対応できるウェークアップ・再送制御機能などを有する通信プロトコルを開発。
- e. 100ch のバックスキヤッタ端末群に対して、各通信チャンネルの品質を総合的に最適化するチャンネル割り当てをインベントリを含めて 1 秒以内に完結する通信制御方式を実現。
- f. 複数のリーダライタの同期による覆域の結合や、複数のバックスキヤッタ端末による同一周波数チャンネルの同時利用により、利用可能な周波数の帯域幅を 2 倍以上とする。なお、必要同期精度は多元接続方式やデータフレーム構成に依存するが、データリンク層 (MAC 層) においても、最大サンプリング周期の 1% 程度を実現すること。

上記の目標を達成するに当たって年度毎の目標については、以下を想定してい

る。

<令和2年度>

主にリーダライタおよびバックスキヤッタセンサの基本設計、要素技術の開発と機能モデル試作を実施する。

- ・ 同期多元接続方式の基本構想の妥当性を、ソフトウェア無線装置を用いたリーダライタとディスクリット試作品による双方向通信バックスキヤッタシステムを試作して評価する。
- ・ 既存電波法令での試作評価を念頭においたリーダライタアーキテクチャを検討する。
- ・ センサに関する高圧・超低温・超高温等の利用環境の調査を行うとともに、利用環境に適合するための要件等について検討する。
- ・ 同期ストリーミング通信のための通信プロトコルの基礎検討を行うとともに、複数リーダライタによる覆域拡大に必要な同期方式についてシミュレーション評価および試作により確認する。

<令和3年度>

基本設計・検討に基づきリーダライタおよびバックスキヤッタ装置の試作を行い、性能・機能の評価する。変復調方式実装が目標cを満足することを確認する。

- ・ 移動バックスキヤッタシステムに対応する変復調方式について検討する。
- ・ リーダライタユニット装置の基本設計を行うとともに、同期バックスキヤッタ受信と干渉除去等に特化した部分試作によって性能評価する。
- ・ バッテリレスセンサのLSI基本設計とFPGA/ディスクリット実装試作による設計評価およびバッテリレスセンサ基本設計を実施する。また端末を稠密に配置することによる相互干渉の影響についても検証し、その改善策を検討する。
- ・ 複数リーダライタシステムの覆域合成方式の検討を行うとともに、部分試作により方式の妥当性を確認する。
- ・ インベントリ、チャネル割り当て、ストリーミング制御及び、移動時にも対応できるウェークアップ・再送制御の連携した動作を試作リーダライタとディスクリットセンサによって確認する。

<令和4年度>

チップメーカー等と連携したバックスキヤッタLSIセンサの試作により目標bを満足するバッテリレス動作を実現するとともに、通信プロトコルを動作させ性能が目標d,eを実現することを確認する。

- ・ 用途に応じたセンサを選択可能なバッテリレスLSIセンサの試作および通信プロトコルの部分モデルを組み込んだリーダライタの開発を行い、それらを組み合わせた双方向通信機能を実現する。センサに関しては、令和2年度に検討した利用環境への適合性も考慮した上で、取り付け人工物の材質や形状などに関わらず安定して

性能を達成する実装技術の開発も行うこと。

- ・ 複数リーダライタの受信データ合成による覆域間干渉除去アルゴリズムと通信プロトコルスタックを連動させるリーダライタシステムを構築する。
- ・ 機械振動試験システムなど既存の有線接続同時センシングシステムを本ボックスキャッタ通信システムの適用でワイヤレス・バッテリーレスシステム化する。

<令和5年度>

複数リーダライタを連携したボックスキャッタ通信システムを産業機械などの人工物に取り付けて動作させ、目標 a, f を実現する。

- ・ 令和4年度までに開発した技術をリーダライタ、ボックスキャッタ端末に組み込み、実証評価を行う。
- ・ 通信プロトコルに関して共用のための技術条件等を整理し、国際標準団体等への情報提供を行う。
- ・ 構造健全性試験、衝突試験、モーダル解析など各種産業分野における有効性を検証する実証実験を実施し、機能性能を評価するとともに、利用環境や測定対象人工物に関わらず性能・機能を達成するように技術の完成度を高める。

なお、実証実験の内容は、研究開発体制として設置する有識者・エンドユーザからなる研究開発運営委員会と調整しながらして決定すること。また、実証モデルとしては、現在、有線加速度センサを用いて実現している多チャンネル振動試験装置やハンマリング試験装置等を想定し、電池なし無線センサ群を利用することの有効性を既存の有線システムとの直接比較によって示すこと。具体的には、到達目標の a(狭帯域信号の場合)、b、d、e 及び f の性能が目標に達しているか定量評価するとともに、a(広帯域信号の場合)及び c については、自動車の衝突試験やドローンを用いた振動試験の実施により目標に対する到達度を評価する。

5. 実施期間

令和2年度から令和5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6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。

バッテリーレスセンサの開発においてはチップメーカー等と連携し、プロセスや設計において既存技術を十分活用するように留意すること。

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。