

＜基本計画書＞

周波数資源の有効活用に向けた高精度時刻同期基盤の研究開発

1. 目的

ネットワークに接続される IoT デバイスの数は今後も加速度的に増加することが見込まれており、無線ネットワークにおいては、多数のモビリティ機器やセンサーの間で画像等の大量のデータをリアルタイムに送受信する用途が拡充され、通信量もさらに爆発的に増大することが危惧される。このことから、各エッジ機器や端末間でメッシュネットワークを構成する分散管理が進むことが見込まれる。また、電波利用のニーズの拡大や多様化などを踏まえ、2025 年度末までに新たに約 16GHz 幅、2030 年代には新たに約 102GHz 幅の周波数帯域の確保が必要（デジタル変革時代の電波政策懇談会報告書、令和 3 年 8 月 31 日）となっており、このような状況では周波数資源の逼迫は避けられない課題となっている。しかし、単純な周波数帯域の拡充だけでは、帯域を個々のデバイスで管理するため、各デバイスに搭載されるアンテナやフィルタ等が増加し、小型端末のボード面積が増大していく課題がある。

そこで、周波数資源の活用を時間軸や空間軸の観点から見直すことで、断続的な通信途絶からの復帰等において逐一実行される同期処理等を抑制・削除することや、端末間の時刻同期精度を向上することで位置同定の精度を向上させ、高指向性の電波送信技術と組み合わせることで、空間的多重度を高め、一部の端末が占有する周波数帯域を最小限に抑制することにより、周波数資源を有効利用することが可能となる。

これらを実現するためには、無線ネットワークの時刻同期精度の大幅な改善が必要不可欠である。そのためには、多くの通信ノードや小型民生機器を含む IoT デバイスが原子時計を搭載できる環境を整えるとともに、原子時計の搭載が困難な端末へも、ネットワーク内の原子時計搭載端末と連携させ、原子時計と同程度の精度の時刻推定を可能にするアルゴリズムを開発する必要がある。

5G 又は Beyond 5G 実現後の社会においては、ドローン制御や自動運転をはじめ、長期的には無人工場や無人港湾の管理など、各センサーや端末間で位置データ・高解像度画像等のデータをリアルタイムに処理する必要のあるユースケースの実現が見込まれている。さらに、世界各国も近年、小型原子時計の通信用民生展開に関心を寄せてきており、国際競争力確保に資する基盤技術を確立するためにも、上記システムを実現する取組は急務である。

そこで、本研究開発では、小型民生機器に搭載可能な小型原子時計と、それを活用し近距離通信において各端末で時刻情報を高精度に同期・管理する時刻同期基盤（以下「高精度時刻同期基盤」という。）を確立するとともに、さらに、端末の位置情報を正確に把握するための時空間座標情報基盤を実現する多点測位システムを

確立する研究開発を行う。これにより、各端末の時刻同期精度・位置精度を向上させ、時間軸や空間軸での利用効率を向上させることで周波数資源の有効利用を促進することを目指す。

2. 政策的位置付け

- ・「科学技術・イノベーション基本計画」（令和3年3月26日閣議決定）

「国土全体に網の目のように張り巡らされた、省電力、高信頼、低遅延などの面でデータやAIの活用に適した次世代社会インフラを実現する」「さらに、宇宙システム（測位・通信・観測等）、地理空間（G空間）情報、SINET、HPC（High-Performance Computing）を含む次世代コンピューティング技術のソフト・ハード面での開発・整備、量子技術、半導体、ポスト5GやBeyond 5Gの研究開発に取り組む」旨が記載されている。

- ・「統合イノベーション戦略 2021」（令和3年6月18日閣議決定）

「国土全体に網の目のように張り巡らされた、省電力、高信頼、低遅延などの面でデータやAIの活用に適した次世代社会インフラを実現する」「さらに、宇宙システム（測位・通信・観測等）、地理空間（G空間）情報、SINET、HPC（High-Performance Computing）を含む次世代コンピューティング技術のソフト・ハード面での開発・整備、量子技術、半導体、ポスト5GやBeyond 5Gの研究開発に取り組む」ことについて、「事業を着実に実施する」旨が記載されている。

- ・「電波政策 2020 懇談会報告書」（平成28年7月、総務省）

「次世代モバイルサービス実現」を見据えた環境整備として「周波数有効利用技術の早期確立と国際標準化活動を進める必要がある」旨が記載されている。

3. 目標

周波数資源の逼迫を解消するために端末の周波数を極めて高精度に維持するとともに、通信するタイミングの精度を究極的に高めることを目標として、小型民生機器に搭載可能な小型原子時計と、それを活用して高精度時刻同期基盤及び端末の位置情報を正確に把握する多点測位システムを確立する。なお、対象周波数帯としては携帯電話サービスで活用される800 MHz帯から5 GHz帯をカバーし、さらに今後の活用が見込まれる数10 GHz帯を超える高周波数帯にも対応する。

具体的には、将来的に小型民生機器が原子時計を搭載できる環境を目指し、小型原子時計を半導体プロセスでの生産で実現する技術を確立することで、原子時計の小型化・低コスト化の道筋をつけ、併せて標準化や規格化を図る。また、原子時計搭載／非搭載端末の混在環境において原子時計と同程度の時刻精度（周波数安定度 10×10^{-11} ）を実現するアルゴリズムや時刻周波数比較機能を有する有無線モジュールの開発・実装を実施し、実機検証を行う。

GNSSは数十ナノ秒オーダーの時刻精度であるが、ネットワーク内の原子時計搭載

端末を連携し管理するためには、数時間程度にわたって時刻比較が必要であり実用的ではない。また、現在一般的に基地局間の同期で使われる PTP (Precision Time Protocol) においても、時刻同期精度はマイクロ秒程度であり、現在の有無線ネットワークにおいて複数の原子時計を管理運用するには精度が不十分である。そこで、本研究開発により、GNSS に依らない環境下でも従来の基地局同期 (PTP) レベルと比べて 1/100 の数十ナノ秒オーダーの時刻精度を無線端末においても実現する。これにより、同期処理のための実際の通信に付帯するオーバーヘッドを削減するとともに、高度な通信スケジューリングを容易にする。また、原子時計の持つ 3.4 GHz 帯での低位相雑音かつ高安定な周波数基準信号を活用し、従来の水晶発振器を用いた場合と比較して符号誤り率 (BER) を 1/100 に改善し QAM 多値化を加速する。これら高度な通信スケジューリングや QAM 多値化などにより、周波数利用効率 (実効的なスループット) を 2 倍以上改善する。

さらに、GNSS による測位と比べて 1 秒積算の位置同定の精度を 100 倍に高めることによって、送信アンテナの協調制御やビームフォーミング技術と組み合わせ、空間多重通信を革新する。これによって、周波数利用効率 (実効的なスループット) を 3 倍以上改善する。

これらの改善によって、周波数資源の有効活用 (上記の周波数利用効率を掛け合わせると合計で 6 倍以上改善) に資することを目標とする。

4. 研究開発内容

(1) 概要

本研究開発では、小型民生機器に搭載可能な小型原子時計と、それを活用して高精度時刻同期基盤及び多点測位システムを確立するため、以下 2 件の研究開発を行う。

【小型で安価な高精度周波数基準実現のための研究開発】

極めて高精度に原子スペクトルを捉える原子時計について、高精度な周波数安定度を維持しつつ小型化・低消費電力化することを目指し、半導体微細加工技術を活用したバッチ生産可能な手法を用いて仕様を満たす構成部品の研究開発を行う。半導体チップとして生産可能な小型原子時計の実現を目指し、構成部品を擦り合わせ評価する装置の研究開発も、標準化を見据えて実施する。

【高精度な時刻同期プロトコル実現のための研究開発】

高精度時刻同期基盤の確立を目的として、端末から生成される時刻周波数情報を管理・運用するためのアルゴリズムの研究開発を行う。また、研究開発したアルゴリズムを実証するための有無線モジュールを研究開発する。具体的には、小型原子時計と高精度時刻・周波数比較装置を搭載した通信機器を研究開発する。その通信機器を用いて有無線混在のネットワーク環境を想定した環境を構築し検証実験を実施する。

また、シミュレーション・実環境での実証実験を通じて、上記の高精度時刻同期基盤を活用して複数ノードの時刻同期により位置情報を特定する多点測位システムの研究開発を実施する。

本研究開発では、小型原子時計を通信ネットワークの中での利用用途を明確にするものであり、従来標準時刻生成など限定的な用途で用いられていた小型原子時計の高精度な時刻を多くのユーザーが享受できるようになるものである。これにより、将来的な市場拡大を見込むことができ、先行的に研究開発を行うことにより、標準化推進・国際的競争力の強化へとつなげる。

なお、各課題間の整合性を図り、課題の着実な進捗管理を実施するため、互いの成果を随時反映し合う形で進めていくことを想定する。

(2) 技術課題および到達目標

技術課題

【小型で安価な高精度周波数基準実現のための研究開発】

ア 原子時計主要構成部品の小型化の研究開発

原子時計は国家による標準時刻の生成・管理の用途から、宇宙・深海などの特殊環境での慣性センシングや、通信網の基地局や中継局での時間管理へと用途が拡張され、実装技術の進展とともに小型化が進んだ。しかしながら、今後の爆発的な発展が期待される無線接続を含む IoT デバイスへの応用に対して、現状の小型化トレンドでは要求仕様を捉えることはできず、部品レベル・材料レベルからの技術革新が必須となる。より具体的には、半導体微細加工技術を活用したウェハーレベルでの原子時計専用部品の作製と、専用の特殊材料の研究開発が求められる。

上記を踏まえ、下記の要素技術の研究開発を実施する。

ア—① ガスセル量産化に向けた研究開発

ルビジウム原子ガスを内包するガスセルをウェハーレベルでバッチ生産する技術の研究開発を行う。

ア—② 可変波長レーザー素子の研究開発

ルビジウム原子の共鳴線取得に特化した波長のレーザー素子の研究開発と、波長の製造バラツキを抑制する機構の研究開発を行う。

ア—③ GHz 帯超小型発振器の研究開発

ルビジウム原子より CPT (Coherent Population Trapping) 共鳴を取得するために発振周波数が最適化された超小型の高周波発振器の研究開発を行う。

イ 原子時計評価システムの研究開発

原子時計は量子的な共鳴現象と高周波回路とを同調させる制御システムであるため、システムを構成する部品には精緻な擦り合わせ評価が必須である。しかしながら、このような評価を行う既存装置はなく、技術者が個々に評価系を構築する必要があった。特に、アの研究開発のように、原子時計用の構成部品を生産することを踏まえると、統一された評価規格と評価装置が必要となる。また、原子時計の性能指数に用いられる周波数安定度の評価には十分に長い計測時間を要することから、研究開発される装置には並列評価の実装も必要となる。

【高精度な時刻同期プロトコル実現のための研究開発】

ウ 小型原子時計を搭載した有無線時刻・周波数同期技術の研究開発

ウ—① 原子時計による時刻管理のためのアルゴリズムの研究開発

原子時計は高精度な周波数標準ではあるが、起動直後に時刻への同期が必要である。この原子時計に正確な時刻を供給して同期するためには時刻比較の精度は原子時計の周波数精度より十分に高い必要があり、原子時計を有効に活用するには、同期処理に活用されるネットワーク内の時刻情報が適切に管理されていなければならない。この時刻管理において、安定性と信頼性を担保しつつ高安定な時刻を供給するために、以下の三つのアルゴリズムを研究開発し、連動させることが必要である。

・時刻生成アルゴリズム

絶対的な時刻基準が存在しないネットワークにて、ネットワークを構成する通信ノード間の時刻・周波数比較から最尤な時刻を推定し生成するアルゴリズムの研究開発を行う。

・時刻供給アルゴリズム

ネットワークから時刻精度を高精度に供給するため、時刻同期の頻度および時刻情報の頒布ルートを個々の通信ノードの周波数精度に応じて最適化するアルゴリズムの研究開発を行う。

・異常（アノマリー）検知アルゴリズム

ネットワーク内の時刻情報を安定に維持するため、時刻・周波数情報を統計的に処理し原子時計の時刻生成の異常（アノマリー）を検知するアルゴリズムの研究開発を行う。

上記のアルゴリズムは、実用の観点から高速に実行できることが望ましく、1秒以下の周期で実行できることが望ましい。また、これらアルゴリズムの動作を実環境に則してシミュレーションすることも重要である。当該シミュレーションによって、アルゴリズムの定量的な評価とともに最適なネットワーク構成の明確化が可能となる。

ウ—② 小型原子時計を搭載した有無線モジュールの研究開発

原子時計の高精度な周波数精度をネットワークの時刻生成に有効活用するには、有無線モジュールは、通信ノードに搭載される汎用の通信モジュールに高精度な時刻周波数比較機能を実装する必要がある。具体的には、 10^{-11} 前半の比較精度を短い処理時間で獲得するため、位相レベルの比較が可能な専用ハードウェアの研究開発が必須となる。また、時刻周波数比較機能の実装は、高い拡張性を実現するため、有線と無線でのクロック伝送方式の差に対応することも重要となる。

エ 多点測位システムの研究開発

アおよびウで研究開発された原子時計及び高精度時刻同期基盤により、通信ノードの時空間座標を高精度に特定する多点測位が可能となる。より具体的には、電波の伝搬時間や位相・周波数情報など、複数の基準点や通信ノードから得られる情報を統合して処理することで高精細な位置同定を実現する。これは、トンネルや室内、アーバン・キャニオン環境といった、衛星からの GNSS 信号が到達できない環境下でも有効活用が期待される。さらに、得られた位置情報を世界測地系に結合することができれば、様々な分野への応用展開も見込まれる。

到達目標

【小型で安価な高精度周波数基準実現のための研究開発】

ア 原子時計主要構成部品の小型化の研究開発

- ・本研究期間中に研究開発する原子時計については、正確かつ安定した時刻精度を確保するために周波数安定度 10×10^{-11} としつつ、サイズ 10cc、消費電力 45mW の小型化・低消費電力化を進める。この目標を実現するためには、半導体プロセスでの小型原子時計の実現が必要であり、半導体プロセスでの実現に向けた各構成部品の目標を下記のように定める。なお、半導体プロセスの適用は、将来の更なる小型化を企図する上でも重要となる。

ア—① ガスセル量産化に向けた研究開発

ガスセルをウェハーレベルで製作する際に課題となるガス状ルビジウム原子の固体ソースの研究開発を実施する。さらに、固体ソースの反応生成物への吸着によるガス組成の長期変動を抑制する技術の研究開発を行い、原子時計の長期的な周波数安定度を改善する。

ア—② 可変波長レーザー素子の研究開発

ルビジウム原子の共鳴線取得に特化した波長のレーザー素子の研究開発を行う。より具体的には、出力 $100 \mu\text{W}$ 以上、中心波長 794.98 nm、線幅（半値全幅）100MHz 以下のレーザー発振を実現する。

さらに低価格化の手段として、製造バラツキを抑制するとともに、従来の電流や熱による波長制御機構以外に波長を制御する機構を実装する。

ア—③ GHz 帯超小型発振器の研究開発

ルビジウム原子の共鳴線取得に特化した超小型高周波発振器の研究開発を実施する。より具体的には、3.417GHz での発振が可能であり、常に共鳴線を捕捉するためにフィードバック用の電圧制御端子を備え、別表 1 の位相雑音を実現する。また、消費電力を 5.0mW 以下に抑制し、発振出力は-6 dBm 以上とする。

セラミックパッケージなどを用いて、1 チップ化を実現し、3 mm×3 mm×1 mm 以下を実現し、70℃～120℃の高温帯での発振動作を確認する。

別表 1. オフセット周波数と目標位相雑音

オフセット周波数	10kHz	100kHz	1 MHz	10MHz
位相雑音	<-100dBc/Hz	<-120dBc/Hz	<-140dBc/Hz	<-140dBc/Hz

イ 原子時計評価システムの研究開発

- ・ ガラス管を用いた標準的なルビジウム原子のガスセルを用いて、ルビジウム原子の共鳴スペクトルを測定し、当該スペクトルを用いて外部の高周波発振装置の周波数を安定化（原子時計動作）するシステムを実現する。ここで安定化の基準として、積算時間 1 秒での短期周波数安定度を 3×10^{-11} 以下を実現する。
- ・ 評価の高速化を目的として、上記システムに並列同時評価を実装する。より具体的には、ガスセルを複数並列で評価可能な構成を実装する。
- ・ 原子時計の個々の構成部品（レーザ素子や高周波発振器等）の性能が原子時計としての安定性に及ぼす影響を定量的に評価するため、これら構成部品を効率的に付け替えられる装置構成を実装する。
- ・ 上記の研究開発の過程において、計測手順、評価手順を確立し規格化・標準化を実施する。

【高精度な時刻同期プロトコル実現のための研究開発】

ウ 小型原子時計を利用した有無線時刻・周波数同期技術の研究開発

ウ—① 原子時計による時刻管理のためのアルゴリズムの研究開発

- ・ ネットワーク内の複数の原子時計の時刻生成精度を同定しつつ時刻推定する時刻生成アルゴリズムの研究開発を行う。
- ・ 原子時計を搭載した通信ノードと非搭載の通信ノードが混在するネットワークにおいて、数十ナノ秒オーダーの時刻同期精度を実現する手段と時刻供給アルゴリズムの研究開発を行う。

- ・通信ネットワークで原子時計の時刻生成のアノマリーを検出し、時刻推定に与える誤差を低減する異常検知アルゴリズムの研究開発を行う。
- ・開発したアルゴリズムを通信ノードに実装したときの時刻同期精度を、シミュレーターを用いて評価し、理論的な整合性を検証する。

ウ—② 小型原子時計を搭載した有無線モジュールの研究開発

- ・有無線モジュールについて、有線接続におけるノード間の時刻の比較精度を1秒積算で 10^{-11} 前半以下、さらに比較確度で0.1ナノ秒以下に抑制する。同様に無線接続における当該比較精度を 10^{-11} 前半以下、さらに比較確度で数ナノ秒以下に抑制する。また、有線ノードと無線ノード間の時刻の比較精度を1秒積算で 10^{-11} 前半以下、比較確度で数ナノ秒以下に抑制する。
- ・小型原子時計が搭載／非搭載の有無線モジュールを複数台作製し、ウ—①のアルゴリズムを実装してネットワーク化したときの実証評価を行う。
- ・原子時計による時刻および周波数の高精度な制御技術の評価・活用し、有効な通信方式を検討（例えばミリ波帯で1024QAM相当など）、実効的なスループットの2倍以上の向上を示す。

エ 多点測位システムの研究開発

- ・小型原子時計を搭載した端末において、位置精度を10cm以下とする高精度な測位を1秒以内の高速で得られる測位システムを実現する。
- ・得られた位置情報は世界測地系との変換を可能にする。
- ・小型原子時計による時刻および周波数の高精度な時刻同期技術や多点測位システムの高精度な位置情報を、ビームフォーミング技術や分散MIMO等の空間多重技術に適用する。これにより電波伝搬環境を改善し、実効的なスループットの3倍以上の向上を示す。

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4年度>

【小型で安価な高精度周波数基準実現のための研究開発】

ア 原子時計主要構成部品の小型化の研究開発

- ・ウェハーレベルでのガスセル生産化の基礎検討
- ・波長可変レーザー素子の研究開発
- ・発振器の研究開発

イ 原子時計評価システムの研究開発

- ・原子時計評価装置の研究開発

【高精度な時刻同期プロトコル実現のための研究開発】

ウ 小型原子時計を搭載した有無線時刻・周波数同期技術の研究開発

- ・ 静的環境下でのアルゴリズム研究開発
- ・ シミュレーション環境整備
- ・ 有無線モジュールの設計、試作

エ 多点測位システムの研究開発

- ・ 多点測位システムの開発環境構築

<令和5年度>

【小型で安価な高精度周波数基準実現のための研究開発】

ア 原子時計主要構成部品の小型化の研究開発

- ・ ウェハーレベルでのガスセルの研究開発
- ・ 波長可変レーザー素子の研究開発
- ・ 発振器の研究開発

イ 原子時計評価システムの研究開発

- ・ 原子時計評価装置の研究開発と評価手順の確立

【高精度な時刻同期プロトコル実現のための研究開発】

ウ 小型原子時計を搭載した有無線時刻・周波数同期技術の研究開発

- ・ 静的環境下でのアルゴリズム研究開発
- ・ シミュレーション環境構築、検証
- ・ 有無線モジュールの設計、試作

エ 多点測位システムの研究開発

- ・ 多点測位システムの研究開発

<令和6年度>

【小型で安価な高精度周波数基準実現のための研究開発】

ア 原子時計主要構成部品の小型化の研究開発

- ・ ガスセル／波長可変レーザー等のパッケージの研究開発
- ・ 原子時計自律動作の検証（発振器の組込）

イ 原子時計評価システムの研究開発

- ・ 原子時計評価装置への並列計測の実装

【高精度な時刻同期プロトコル実現のための研究開発】

ウ 小型原子時計を搭載した有無線時刻・周波数同期技術の研究開発

- ・ 動的環境下でのアルゴリズム研究開発、実装
- ・ シミュレーションによる評価検証
- ・ 有無線モジュールの作製
- ・ 実証実験環境及び設備の整備

エ 多点測位システムの研究開発

- ・ 多点測位システムの検証
- ・ 空間多重（ビームフォーミング技術等）の活用によるスループット改善のための実証実験環境及び設備の整備

<令和7年度>

【小型で安価な高精度周波数基準実現のための研究開発】

ア 原子時計主要構成部品の小型化の研究開発

- ・ 開発した小型部品を活用した原子時計のパッケージ化（試作品組立）

イ 原子時計評価システムの研究開発

- ・ 並列評価可能な原子時計評価装置のパッケージ化と評価手順の確立

【高精度な時刻同期プロトコル実現のための研究開発】

ウ 小型原子時計を搭載した有無線時刻・周波数同期技術の研究開発

- ・ 動的環境下でのアルゴリズム研究開発、実装
- ・ 実証実験評価

エ 多点測位システムの研究開発

- ・ 空間多重（ビームフォーミング技術等）の活用によりスループット改善効果を実証

5. 実施期間

令和4年度から7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 12 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。また、令和 12 年度にはサイズ 0.5cc 以下、消費電力 3mW 以下とすることを目指しており、これを加味した目標や取組について記載すること。

(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。