

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

Advanced Time Synchronization Infrastructure for Efficient Spectrum Utilization

研究代表者

原基揚 情報通信研究機構

Motoaki Hara National Institute of Information and Communications Technology

研究分担者

島田弥力[†], 平井義和^{††}, 堀靖志^{†††}, 味岡厚^{†4}, 小池勇人^{†4}, 小室栄樹^{†4}, 須田慶太^{†4}, 大村孝幸^{†5}, 武宮孝嗣^{†5}, 山田将来^{†5}, 福岡政大^{†6}, 年吉洋^{†7}, メノン ヴィヴェーク アナンド^{†7}, 諫本圭史^{†8}, カーン モハメド サード^{†8}, 西山伸彦^{†9}, シャフィクル モハマト イスラン^{†9}, 伊藤浩之^{†9}, 道正志郎^{†9}, 小島正敏^{†9}, 五箇繁善^{†10}, 波多野智^{†11}, 小田切雄介^{†11}, 矢野雄一郎^{†6}, 石崎孝幸^{†9}, 川口貴弘^{†12}, 持田峻佑^{†12}, 宇賀神悠資^{†12}, 齊藤凌輔^{†12}, 小池雅和^{†13}, 井戸哲也^{†6}, 岩本哲也^{†14}, 倉田陽介^{†14}, 原山淳^{†14}, 橋本直也^{†14}, 百武健二^{†14}, 川野真裕^{†14}, 浪江敦志^{†14}, 織田健太郎^{†14}, 長尾勇平^{†15}, 志賀信泰^{†6}, 安田哲^{†6}, 山本享弘^{†16}, 有山大祐^{†16}, 最上谷真仁^{†16}, 高橋健吾^{†16}, 中下総^{†16}, 天利友弥^{†16}, 小島直子^{†16}, 丸山玲来^{†16}, 稲村宇宙^{†16}, 大堀凜^{†16}, 寺尾和洋^{†16}, 荒木秀彦^{†16}, 角大樹^{†16}, 戸田光洋^{†16}, 末武雅之^{†16}, 宮本翔^{†16}, 曹芝馨^{†16}, 尾知博^{†17}, 黒崎正行^{†17}, 市川隆一^{†6}

Miroku Shimada[†], Yoshikazu Hirai^{††}, Yasushi Hori^{†††}, Atsushi Ajioka^{†4}, Hayato Koike^{†4}, Eiju Komuro^{†4}, Keita Suda^{†4}, Takayuki Ohnura^{†5}, Kouji Takemiya^{†5}, Masaki Yamada^{†5}, Masahiro Fukuoka^{†6}, Hiroshi Toshiyoshi^{†7}, Vivek Anand Menon^{†7}, Keiji Isamoto^{†8}, Mohammed Saad Khan^{†8}, Nobuhiko Nishiyama^{†9}, Mohammad Islam Shafiqul^{†9}, Hiroyuki Ito^{†9}, Shirou Dosho^{†9}, Masatoshi Kojima^{†9}, Shigeyoshi Goka^{†10}, Satoshi Hatano^{†11}, Yusuke Odagiri^{†11}, Yuichiro Yano^{†6}, Takayuki Ishizaki^{†9}, Takahiro Kawaguchi^{†12}, Shunsuke Mochida^{†12}, Yuji Ugajin^{†12}, Ryosuke Saito^{†12}, Masakazu Koike^{†13}, Tetsuya Ido^{†6}, Tetsuya Iwamoto^{†14}, Yousuke Kurata^{†14}, Atsushi Harayama^{†14}, Naoya Hashimoto^{†14}, Kenji Hyakutake^{†14}, Masahiro Kawano^{†14}, Atsushi Namie^{†14}, Kentaro Oda^{†14}, Yuhei Nagao^{†15}, Nobuyasu Shiga^{†6}, Satoshi Yasuda^{†6}, Takahiro Yamamoto^{†16}, Daisuke Ariyama^{†16}, Mogamiya Masahito^{†16}, Kengo Takahashi^{†16}, So Nakashita^{†16}, Tomoya Amari^{†16}, Naoko Kojima^{†16}, Riku Maruyama^{†16}, Sora Inamura^{†16}, Ohori Rin^{†16}, Kazuhiro Terao^{†16}, Hidehiko Araki^{†16}, Daiki Sumi^{†16}, Mitsuhiro Toda^{†16}, Masayuki Suetake^{†16}, Sho Miyamoto^{†16}, Yixin Cao^{†16}, Hiroshi Ochi^{†17}, Masayuki Kurosaki^{†17}, Ryuichi Ichikawa^{†6}

[†]東洋紡エムシー ^{††}京都大学 ^{†††}マイクロジェット ^{†4}TDK ^{†5}浜松ホトニクス ^{†6}情報通信研究機構 ^{†7}東京大学 ^{†8}santec OIS ^{†9}東京科学大学 ^{†10}東京都立大学 ^{†11}ネオアーク ^{†12}群馬大学 ^{†13}東京海洋大学 ^{†14}セイコーソリューションズ ^{†15}レイドリクス ^{†16}コア ^{†17}九州工業大学

[†]TOYOBO MC Corp. ^{††}Kyoto University ^{†††}MICROJET Corp. ^{†4}TDK Corp. ^{†5}Hamamatsu Photonics K.K. ^{†6}National Institute of Information and Communications Technology ^{†7}University of Tokyo ^{†8}santec OIS Corp. ^{†9}Institute of Science Tokyo ^{†10}Tokyo Metropolitan University ^{†11}NEOARK Corp. ^{†12}Gunma University ^{†13}Tokyo University of Marine Science and Technology ^{†14}Seiko Solutions Inc. ^{†15}Raidrix Inc. ^{†16}CORE CORP. ^{†17}Kyushu Institute of Technology

研究期間 令和4年度～令和7年度

概要

本研究は、周波数利用効率の向上を目的として、高精度時刻同期基盤を提案するものである。本基盤により通信タイムングの協調が可能となり、電波遅延の計測を通じて空間情報を取得することで、指向性に基づく空間分離を効率的に実現できる。高精度時刻同期基盤の構築に向けて、デバイス搭載可能な高安定クロックとして超小型原子時計を要素部品レベルから開発し、評価環境を整備した。また、原子時計が広範に搭載される社会を想定し、分散的に安定した時刻共有技術を数理的・実験的に検討した。さらに、無線時刻同期を前提とした動的デバイスに対し、カメラやセンサとの連携可能性について先進的に議論を進めた。

Abstract

This study presents an advanced time synchronization infrastructure for efficient spectrum utilization. By enabling coordinated transmission timing, the proposed infrastructure facilitates spatial separation based on radio propagation delays and signal directivity. To establish this infrastructure, we developed a miniature atomic clock using a component-level, wafer-process-based approach and formulated a mathematically grounded distributed time synchronization algorithm, which was implemented and validated on hardware. The infrastructure was further extended to wireless time synchronization, demonstrating communication performance improvements and indicating its potential for spatial synchronization and multi-point localization in dynamic environments.

表 1. 開発マイルストーンと開発の現在地

Product	Component	MAC	ULPAC	CLIFS1		CLIFS2
				Milestone 2025	The current status	Milestone 2030
Signal Processing	Micro Controller	20	7.6	5.58	5.58	4.32
	DAC, ADC	13	21.9	17.05	20	6.82
	Locking	8	9.2			
Physics	VCSEL Driver	3	3	7	7	3
	Heater	7	9.1			
	Coil	1	1			
	VCO	32	2	9.1	12.4	9.1
Microwave/ RF	PLL	20				
	Buffer	1				
	TCXO	7	7			
Power Manager & Passive Parts Loss		13	6.2			
Total		125	62.9	39.78(<45)	44.98(<45)	23.24(<25)

単位(mW)

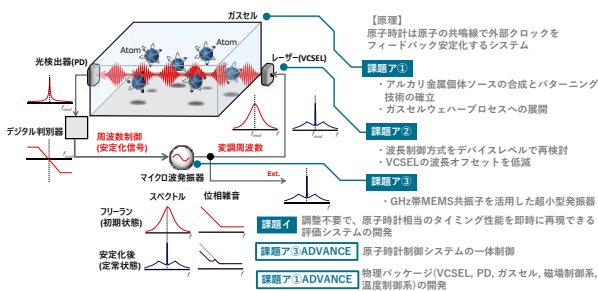
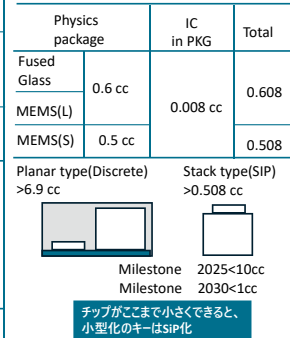
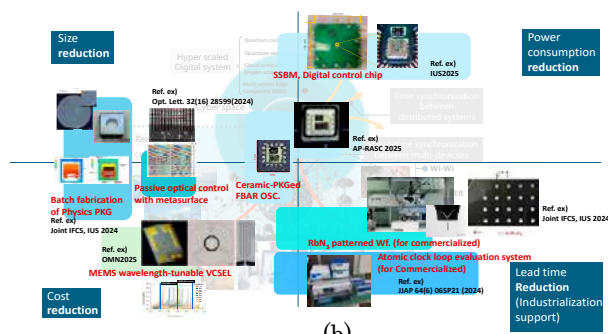


図 1. 超小型原子時計の開発アプローチ

Approach	Technology	Efficiency				Counterpart
		Size reduction	Power consumption reduction	Cost reduction	Lead time Reduction (Industrialization support)	
CMOS Integration	Frequency tuning	SSBM, Digital control	○	◎	-	Multi-chip module
	RF oscillator	FBAR, LTCC	◎	◎	◎	X-tal osc.
MEMS Integration	VCSEL	Movable MEMS Mirror (Wavelength control)	-	-	◎	-
	Packaging	Meta-surface (Laser pass control)	◎	-	○	Optical plates
	Gas cell	Batch fabrication	◎	-	◎	Glass tube
Industrial support	Material	RbN ₃ Patterned Wf.	○	-	◎	Dispenser pellet
	Evaluation system	-	-	○	◎	-

(a)



(b)

図 2. 超小型原子時計開発のポートフォリオテーブル(a)およびマッピング(b)

1. まえがき

IoT デバイスの急増や画像・センサデータを中心とするリアルタイム通信需要の拡大により、無線通信における周波数利用は量的増大にとどまらず、時間精度や遅延制約に対する要求の高度化という質的变化を伴って進行している。一方で、周波数帯域の追加確保には物理的・制度的限界があり、従来の帯域拡張に依存した対応は持続的とは言



図 3. 技術統合のロードマップ

えない。今後は、通信の同時性そのものを制御対象とし、時間軸・空間軸を含めた周波数利用形態の再設計が不可欠となる。

本研究は、周波数利用効率の向上を目的として、高精度時刻同期基盤の確立を目指すものである。まず、全デバイスに安定した時刻を保持させる基盤として、ホールドオーバー性能に優れた原子時計の超小型化を目指す。開発方針としては、原子時計を完成品としてではなく要素技術に分解し、半導体プロセスを前提とした独自のアプローチにより小型・低消費電力化を進めた。併せて、原子時計が広く搭載される社会を想定し、分散ネットワークにおける時刻生成問題を数理的にモデル化し、分散時系アルゴリズムを導出・実装して実機検証を行った。さらに、無線時刻同期による空間的同調制御を通じて通信性能の向上を確認するとともに、時刻情報の空間同期・多点測位への展開可能性を、フィールドワークを通して示した。

2. 小型原子時計の研究開発

—半導体プロセスによる高精度周波数基準の実現—

小型原子時計に関する従来の研究では、MEMS 技術等を用いた小型化や低消費電力化が進められてきた一方、完成品単位での最適化は製造プロセスや供給主体の固定化を招きやすく、継続的な改良や社会実装の観点では構造的な制約を伴う場合が多かった。本研究ではこの点に着目し、原子時計を単一の完成デバイスとして高度化するのではなく、その構成要素を設計単位として切り分け、半導体プロセスを前提とした基盤技術として立ち上げる研究アプローチを採用した。これは、将来、原子時計が広くデバイスに搭載される社会を見据え、特定の技術方式や実装形態に依存しない形で技術の継続的発展を可能とすることを目的としたものである。

原子時計は、原子が持つ固有の共振周波数を基準として

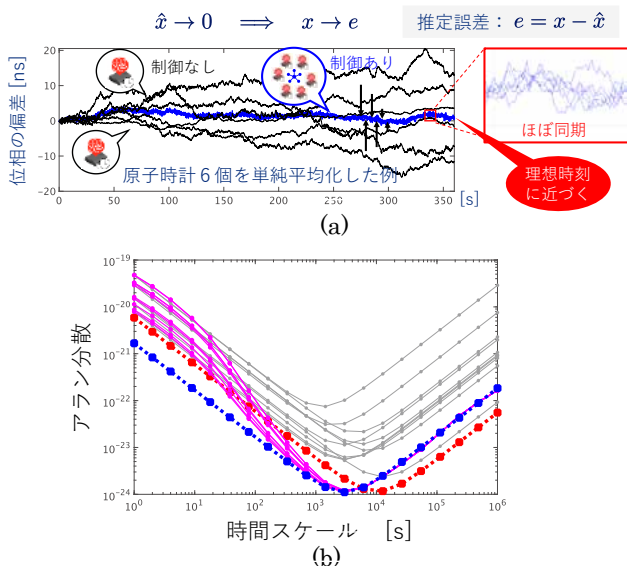


図 4. 分散時系アルゴリズムによるアンサンブル安定化: (a) マルチクロック安定化、(b)安定化による周波数安定度評価 (●)、重みづけ平均による短期安定度最適化(●)

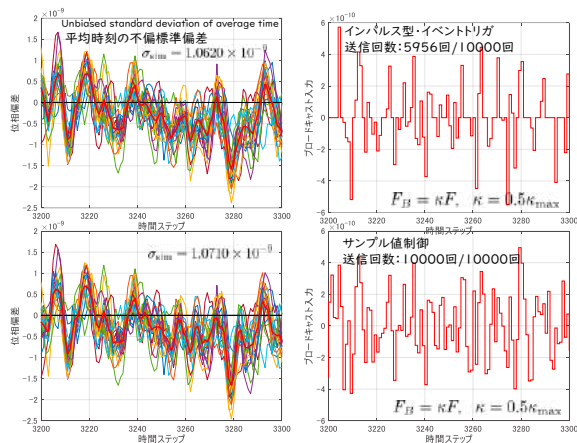


図 5. GNSS アンカリングのイベントトリガ制御によるプロードキャストタイミングの抑制検討

発振器の周波数を制御することにより、高い周波数安定度を実現するデバイスである(図 1)。本研究ではその動作原理に基づき、小型原子時計を構成する要素として、原子の共鳴特性を担うガスセル、原子遷移を励起・検出する光学要素(可変波長レーザー素子)、ならびに原子応答を周波数制御に反映する発振器および制御回路を設計単位として切り分けた。加えて、これら各要素技術の長期安定性や個体差を定量的に評価し、継続的な改良を可能とするため、評価・検査基盤の整備を並行して進めた。これらの要素部品および評価基盤は、いずれもウェハプロセスにより製造・改良可能な単位として再定義されている。

この要素分解型の設計に基づき、ガスセル、レーザー素子、発振器についてそれぞれ試作および評価を行い、半導体プロセスを前提とした小型化および実装可能性を確認した。特に、周波数基準の物理的根幹を担うガスセルについては、量産性および長期安定性を考慮した構造設計と評価を実施した。また、原子応答を安定に読み出すための光学系および周波数制御系についても、デバイス実装を意識した構成で検討を進めた。さらに、完成品を前提に毎回評価を行うのではなく、要素技術の改良を迅速に反映可能とする評価・検査基盤を並行して整備した。図 2 に本研究開発のポートフォリオをまとめる。

これらの要素技術を統合した結果、小型原子時計モジュ

ールとしての自律発振動作を確認するとともに、従来方式と比べて体積および消費電力の両面で 2025 年度のマイルストーンを満足する結果を得た(図 3 および表 1)。このことは、要素分解型の我々の開発アプローチの有効性を示しているとも言える。

本研究で得られた成果は、単一の原子時計完成度の高さを示すものにとどまらず、原子時計を社会基盤として展開するための要素技術と評価基盤を整備した点に意義がある。以降の章では、これらの小型原子時計を前提として、分散ネットワークにおける高精度時刻同期基盤の構築と、そのフィールドおよび空間応用への展開について述べる。

3. 高精度時刻同期基盤の研究開発

ー原子時計をネットワークで

“使える”時刻にする技術ー

超小型原子時計の社会実装を想定した場合、単一の時刻源に依存した従来型の同期方式では、大規模化や動的なネットワーク構成に対応することが困難となる。本研究ではこの課題に対し、多数の時計ノードが分散配置された環境において、個体差やドリフト、異常を許容しながら安定した時刻を共有するための高精度時刻同期基盤の構築を目的とした。

まず、分散時系における時刻生成問題を数理的にモデル化した。時刻は観測可能な絶対的真値として存在するのではなく、各時計間の差分の積算として定義される量である。この性質を踏まえ、分散ネットワークにおける最尤時刻推定の枠組みとしてカルマンフィルタを適用し、分散時系アルゴリズムを導出した。さらに、生成される時系列の安定性について解析を行い、長期安定度および短期安定度の観点から最適な時刻生成が可能であることを理論的に明らかにした(図 4)。

また、分散時系に外部時刻源を導入する場合を想定し、GNSS などをアンカーとして用いた時刻参照の取り扱いについて検討した。外部基準は絶対的な真値ではなく、分散的に生成される時刻系を拘束するための弱い参照として機能するものであり、同期系全体の安定性を損なわない範囲でのゲイン設定が重要となる。本研究では、数学的解析に基づき適切なアンカリング条件を導出するとともに、一定周期での参照配信に代えて、時刻状態に応じて参照回数を抑制するイベントトリガ制御を提案し、その有効性をシミュレーションにより確認した(図 5)。

次に、数理モデルで得られた洞察が実環境においても有効であることを検証するため、段階的な検証プロセスを構築した。まず、すべてを数値モデルとして扱う MATLAB シミュレーションにより基本動作を確認し、その後、通信部分を実機化したシミュレーション環境を用いて、伝搬遅延、通信ノイズ、配線の影響などを抽出した。これにより、理論モデルと実環境との差異を段階的に把握し、数理的知見が実システムにおいても成立するよう補正を行った。

最終的に、有線環境においてサブナノ秒級の時刻同期が可能な時刻同期モジュールを開発し(図 6)、高精度な時刻基盤を確立した。さらに、この有線時刻同期モジュールを基盤として、分散時系アルゴリズムおよび異常検知機能を実装し、実機による検証を行った(図 7,8)。その結果、分散時系アルゴリズムがサブナノ秒級同期基盤の上で安定に動作し、実機環境においても有効に機能することを確認した。加えて、有線モジュールと無線モジュールを階層的に接続した構成により、空間伝送を含む時刻同期の初期検証を実施し、無線環境においても所定の精度および確度が得られることを示した。

本章で示した高精度時刻同期基盤は、数理モデルから実装・検証までを一貫して構築した点に特徴があり、次章で述べるフィールド環境および空間応用に向けた時刻基盤としての成立条件を明らかにするものである。

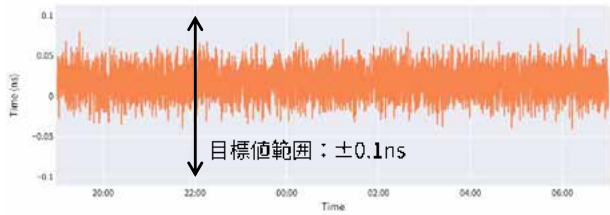


図 6. サブナノ秒級の同期精度を有する有線時刻同期モジュール

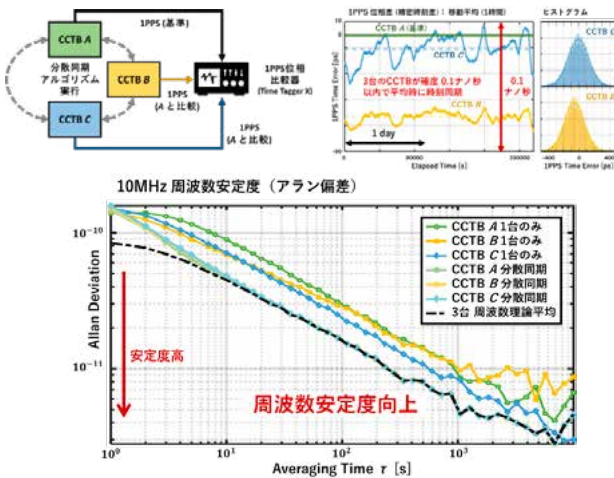


図 7. 分散時刻同期アルゴリズムの実装と検証結果

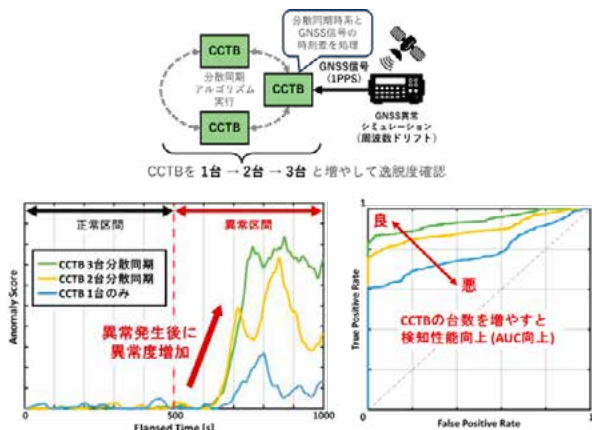
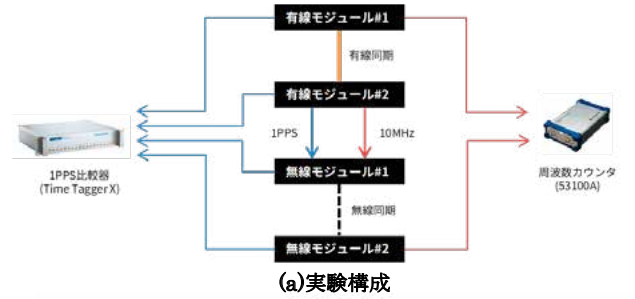


図 8. 異常検知アルゴリズムの実装と検証結果

4. 多点測位と空間多重への展開技術

前章までに構築した高精度時刻同期基盤を実環境へ展開し、時刻同期が通信および空間情報処理にもたらす効果を検証した。まず、前章で示した有線時刻同期モジュールと無線時刻同期モジュールの接続実験結果を図 9 に示す。本実験により、時刻精度 10 ns、周波数安定度 10^{-11} 以下が達成され、時刻同期の空間伝送が可能であることを確認した。これらの結果を踏まえ、以下では、有線環境で確立した時刻基盤をフィールド環境へ拡張し、無線通信性能の向上ならびに空間同期・多点測位への応用可能性について議論する。

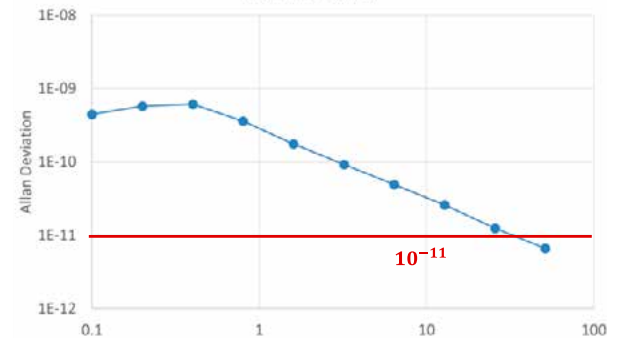
フィールド環境で高精度な時刻基準を配信するため、



(a)実験構成



(b)時刻差評価(精度評価)



(c)周波数安定度評価(精度評価)

図 9. 有無線時刻同期モジュールの接続評価

GNSS をアンカーとした時刻基準配信方式を検討した。有線時刻同期においてサブナノ秒級の精度が得られたことを受け、フィールドにおいても同等レベルの精度を持つ基準配信を実現することが重要となる。ここでは、MADOC-PPP による高精度時刻補正を活用した GNSS アンカーを開発し、このニーズに対応した(図 10)。また、広域電離層補正を用いた GNSS 解析により時刻同期の収束時間を短縮するとともに(図 11)、高安定クロックを併用することで時刻配信の安定化およびスプーフィング検知性能の向上を図った(図 12)。その結果、UTC (NICT) に対してサブナノ秒級の精度と確度で時刻基準を供給できる環境が構築された。

続いて、第 2 章、第 3 章とで開発した高精度時刻同期基盤が無線通信の性能に与える影響を検証した(図 13)。複数のアクセスポイントを空間的に配置した環境において、時刻同期の有無が干渉抑圧および協調動作に与える影響を、時間オフセット、キャリア周波数オフセット、サンプリング周波数オフセットの観点から評価した。シミュレーションおよび実機検証の結果、原子時計レベルの時刻精度を用いることで、逐次干渉除去 (SIC) を適切に機能させることが可能となり、スループットが従来方式に比べて大幅に向上することが確認された。この結果は、無線時刻同期が単なる補助機能ではなく、空間的に分散した通信ノードの同調制御を可能とし、周波数利用効率の向上に直接寄与す

る基盤技術であることを示している。

さらに、時刻同期情報を空間情報へ展開することで、多点測位および異種デバイス連携への応用を検討した。有線時刻同期モジュール、無線双方向測位 (Wi-Wi)、GNSS、ならびにカメラやセンサを組み合わせた実験環境を構築し、定点および移動体を含むフィールドでの位置推定精度を比較評価した。その結果、ナノ秒級の時刻同期を前提とした Wi-Wi 測位においては、短時間の積算でセンチメートルオーダーの距離推定精度が得られ、GNSS やカメラ単独では困難な環境においても安定した空間情報取得が可能であることを確認した。また、カメラやセンサと時刻情報を共有することで、異種デバイス間の時空間的な整合性を高められることが示された(図 14)。

これらの検証結果から、高精度時刻同期基盤は通信性能の向上にとどまらず、空間同期や多点測位といった空間情報処理への展開を可能とする基盤技術であることが明らかとなった。動的なデバイス構成や実環境においても、時刻を共通基盤として用いることで、通信・測位・センシングを横断的に統合できる可能性が示されており、次世代の分散協調システムにおける重要な技術要素となり得る。

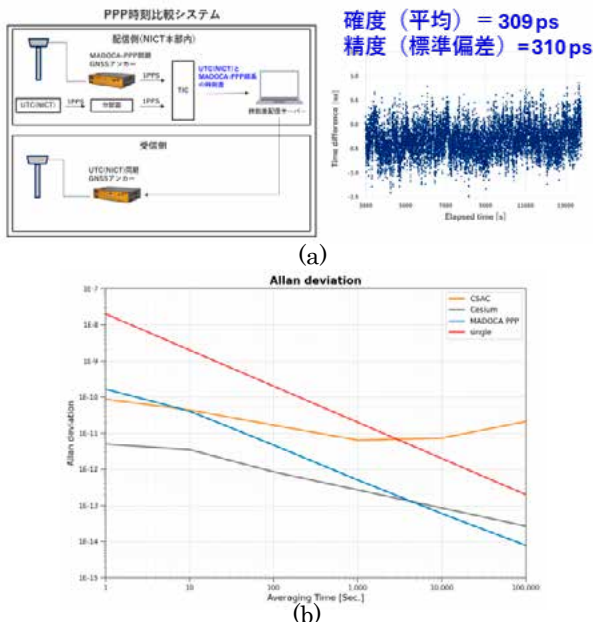


図 10. サブナノ級時刻同期 GNSS アンカー: (a) UTC(NICT) とサブナノ秒の精度と確度で時刻同期, (b) 従来の GNSS よりも 2 桁近く高い周波数安定度

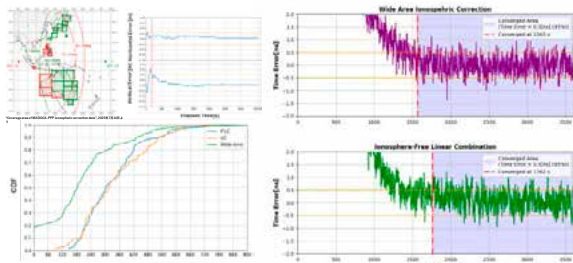


図 11. 広域電離層補正による時刻同期収束時間の短縮

5. 今後の研究成果の展開

第 2 章で述べた超小型原子時計の研究開発については、キー材料となるアルカリ金属固体ソースおよびそのパターンニング技術、ならびに原子時計要素部品の評価技術が確立されており、超小型原子時計開発の支援技術として、直

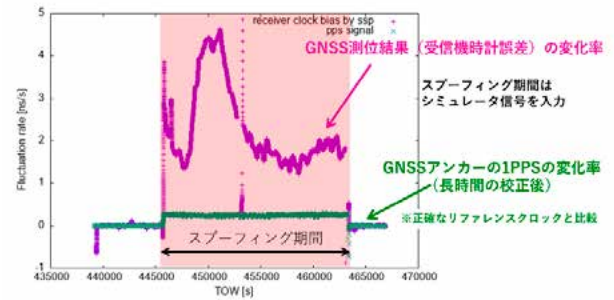
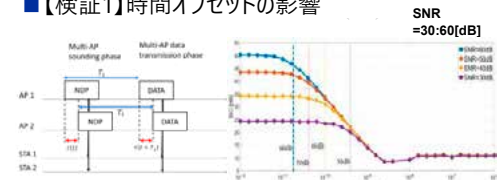
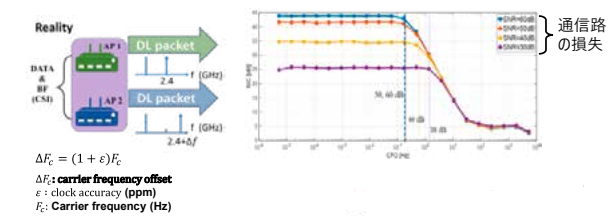


図 12. スーパーフィング検知性能

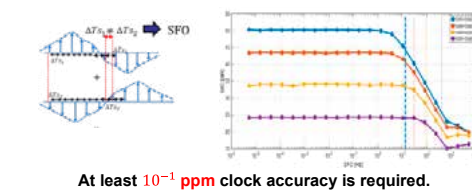
■【検証1】時間オフセットの影響



■【検証2】キャリア周波数オフセット(CFP)の影響



■【検証3】サンプリング周波数オフセット(SFP)の影響



At least 10^{-1} ppm clock accuracy is required.

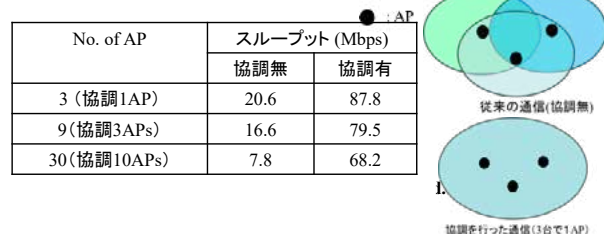


図 13. 時刻同期性能改善とマルチアクセスポイント協調通信の品質の関係解析

ちに実用展開が可能な段階にある。また、原子時計本体についても、2025 年度のマイルストーンとして設定していた数値目標を達成しており、2030 年度のマイルストーンに向けた開発を継続する。今後は、開発の進展に応じて主要部品の段階的な市場展開を見込む。

第 3 章で述べた分散時系アルゴリズムは、原子時計、UTC や GNSS アンカー、さらには原子時計より周波数安定度の劣る水晶時計を含む構成要素を対象とした最尤推定の枠組みとして整理されている。本アルゴリズムは、これらに限定されるものではなく、光格子時計やイオン時計といった、より高性能な時計をネットワーク上位に組み込むことも可能である。これにより、階層的な時刻アンサンプルの構成や、ネットワーク全体の安定度向上を目的とした支援技術として、活用範囲の拡大が期待される。

さらに、第 4 章で示した実フィールドにおける高精度時

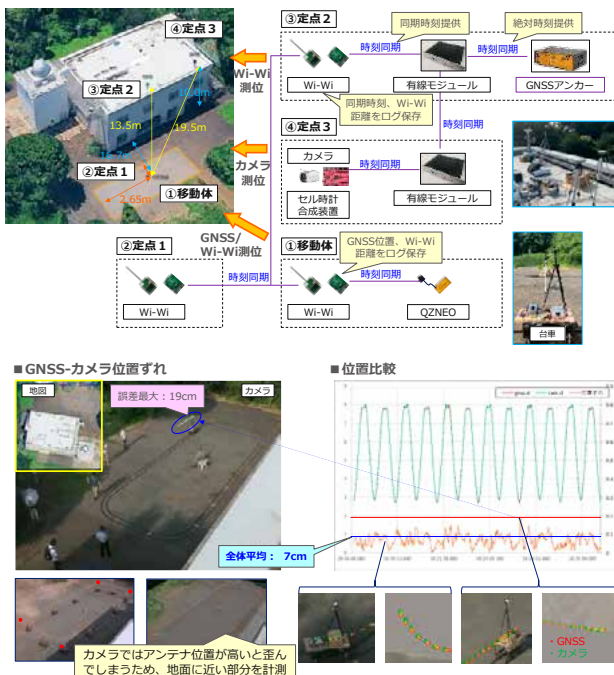


図 14. マルチデバイス環境での時空間同期比較

時刻同期および空間同期に関する検討は、近年注目されているフィジカル AI や分散協調システムとの親和性が高い。時刻を共通基盤として用いることで、通信、測位、センシング、制御を横断的に統合する応用が可能となり、今後はより発展的なフィールド実証や応用展開が期待される。

6. むすび

本研究では、周波数利用効率の向上という課題に対し、高精度時刻同期を基盤とした包括的なアプローチを提示した。まず、超小型原子時計を完成品としてではなく要素技術に分解し、半導体プロセスを前提とした設計と評価基盤の整備を通じて、将来的なデバイス展開を見据えた高安定クロック開発基盤を構築した。次に、分散ネットワークにおける時刻生成問題を数理的にモデル化し、分散時系アルゴリズムを導出・実装することで、実機環境においても高精度な時刻同期が成立することを示した。

さらに、有線環境で確立した時刻基盤をフィールドに展開し、GNSS アンカーを用いた高精度時刻基準配信、無線時刻同期による通信性能向上、ならびに多点測位や空間同期への応用可能性を明らかにした。これらの結果は、時刻同期が単なる補助的機能ではなく、空間的同調制御や協調通信を可能とする基盤条件であることを示している。

本研究で構築した高精度時刻同期基盤は、通信、測位、センシングといった異なる機能を時間情報の下で統合する可能性を有しており、動的かつ分散的な次世代社会システムの基盤技術として重要な役割を果たすと考えられる。今後は、より大規模なフィールド環境への展開や、異種デバイスとの連携を通じて、時刻を核とした無線システムの高度化と周波数資源利用の最適化を進めていく予定である。

【査読付き誌上発表論文】

- [1] Takayuki Ishizaki, Taichi Ichimura, Takahiro Kawaguchi, Yuichiro Yano, Yuko Hanado, "Higher-Order Allan Variance for Atomic Clocks of Arbitrary Order: Mathematical Foundation", Metrologia, Vol 61, No.1 (2023/12/20)

- [2] Yusuke Odagiri, Satoshi Hatano, Yuichiro Yano, Masahiro Fukuoka, Motoaki Hara, and Shigeyoshi Goka, "Stabilization method for atomic clocks to detect the maximum coherent-population-trapping resonance signal", Jpn. J. Appl. Phys. Lett., Vol.64 No.6 pp06SP21 (2025/6/24)

- [3] Murugesan Sathishkumar, Takayuki Ishizaki, Yen-Chen Liu, "Sampled-Data-Based Synchronization of Complex Networks Under Scaling Attacks," Mathematical Methods in the Applied Sciences, 47(18) pp.14487-14504, (2024 年 6 月 15 日)

【その他の誌上発表】

- [1] 原 基揚, "あらゆる通信ノードに搭載可能な原子時計チップの開発を目指して", 電波技術協会報 2024 3 No.357, pp.46-49
- [2] 矢野 雄一郎, 柿沼 優人, 川口 貴弘, 織田 健太郎, 石崎 孝幸, 川野 真裕, 百武 健二, 橋本 直也, 大塚 信吾, 倉田 陽介, 岩本 哲也, 原 基揚, 花土 ゆう子, 井戸 哲也, "時刻同期ネットワークにおける複数の小型原子時計を用いた周波数安定化の検討", 電気学会 電子・情報・システム部門 電子回路研究会 ECT-23-048-053, pp. 1-4(2023/9/8)
- [3] 原 基揚, 矢野 雄一郎, 安田 哲, 福岡 政大, 志賀 信泰, 市川 隆一, 井戸 哲也, "Beyond 5G を実現する時空間同期技術", 情報通信研究機構研究報告 Vol.70 No.1 (2024 年 10 月 15 日)

【査読付き口頭発表論文】

- [1] Shun Kiyose, Miroku Shimada, Yasushi Hori, Yusuke Odagiri, Satoshi Hatano, Yuichiro Yano, Shigeyoshi Goka, Yoshikazu Hirai, Motoaki Hara "Wafer-scale microfabrication for alkali-metal vapor cells using inkjet printed rubidium azide", 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium (2024 年 9 月 24 日)
- [2] Masahiro Kawano, Yosuke Kurata "A Mathematical Model of D-DMTD Glitch Signal and Performance Evaluation of Its Deglitchers Using Monte Carlo Simulation", IEEE ISPCS 2024 (2024 年 10 月 9 日)
- [3] Kengo Takahashi, Hidehiko Araki, Kazuhiro Terao, Daiki Sumi, Takahiro Yamamoto, Yuichiro Yano, Ryuichi Ichikawa, "MADOCA disciplined oscillator, Satellite-only PPP", IEEE ISPCS2024 (2024 年 10 月 9 日)

【口頭発表】

- [1] Motoaki Hara, "Chip-Level Integrated Frequency Standard (CLIFS): How do we realize the chip for the atomic clock?", the 19th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2024) (2024 年 5 月 3 日)
- [2] 川口貴弘, 持田峻佑, 矢野 雄一郎, 倉田陽介, 小池雅和, 石崎孝幸, "原子時計アンサンブルによる時系生成のための高信頼・低計算負荷カルマンフィルタアルゴリズム", 電気学会 電子回路研究会(2024 年 9 月 13 日)
- [3] 高橋 健吾, 荒木 秀彦, 角 大樹, 寺尾 和洋, 山本 享弘, 矢野 雄一郎, 市川 隆一, 準天頂衛星みちびきを活用した高精度時刻同期とスプーフィング検知への応用, 電気学会 第8回新方式精密計測による物理・工学的変革を目指す回路技術調査専門委員会 (2024 年 12 月 7 日)

【申請特許リスト】

- [1] 山本 享弘、最上谷 真仁、高橋 健吾、寺尾 和洋、
荒木 秀彦、情報処理装置、情報処理方法及び情報処理
プログラム、日本、特願 2025-057822、2025 年 3 月 31
日
- [2] 原 基揚、福岡 政大、伊藤 浩之、五箇 繁善、原子発振
器、日本、特願 2024-202814、2025 年 11 月 20 日
- [3] 川口貴弘、石崎孝幸、矢野雄一郎、倉田陽介、状態推定
装置およびプログラム、特願 2024-171082、日本、2024
年 9 月 30 日

【受賞リスト】

- [1] 平井義和、清瀬俊、村上諒、島田弥力、原基揚、諫早伸
明、江崎裕子、沖村満、岸村真治、瀬戸弘之、文部科学省
文部科学省 マテリアル先端リサーチインフラ 令和 7
年度 秀でた利用成果優秀賞、“超小型原子時計の量産
化に向けたガスセル製造技術”、2026 年 1 月 28 日
- [2] 原基揚、戦略的情報通信研究開発推進事業 令和 7 年
度 成果展開推進賞、“原子スペクトルを利用した超高
安定発振器チップに関する研究開発”、2026 年 2 月 4 日
- [3] NICT 時空標準研究室標準化チーム、ITU 協会賞奨励
賞、“IMT-2030 Future technology trend への入力”、
2023/05/17

【報道発表リスト】

- [1] 東工大・群馬大・NICT 連名プレスリリース：原子時
計の多様な時刻ゆらぎを評価する数学的基礎を構築 ～
次世代無線通信 Beyond5G/6G に不可欠な高精度時刻同
期に貢献～(2023/12/20)

【国際標準提案リスト】

- [1] 3GPP TSG SA WG1 Meeting #108、Use case on safety
assistance for vulnerable pedestrians、2024 年 11 月
19 提案、2024 年 11 月 19
- [2] 3GPP TSG SA WG 1 Meeting #110、Use Case on
Remote and Automatic Construction、2024 年 11 月 19
提案、2025 年 5 月 23
- [3] 3GPP TSG SA WG1 Meeting #108、Use Case on
Critical infrastructure Monitoring、2024 年 11 月 19 提
案、2025 年 8 月 29

【参加国際標準会議リスト】

- [1] 3GPP TSG SA WG1 Meeting #111、ヨーテボリ(スウ
ェーデン)、2025 年 8 月 25-29 日
- [2] 3GPP TSG SA WG1 Meeting #112、ダラス(米国)、
2025 年 11 月 17-21 日
- [3] 3GPP TSG SA WG1 Meeting #113、ゴア(インド)、
2026 年 2 月 9-13 日