

令和 7 年度事前事業評価書

政策所管部局課室名：国際戦略局 技術政策課

評価年月：令和 7 年 8 月

1 政策（研究開発名称）

超高周波次世代通信システムに向けた高安定高周波クロック及び高精度時刻同期モジュールの研究開発

2 達成目標等

(1) 達成目標

トラフィック増加傾向を踏まえ、携帯電話用周波数の更なる確保について検討課題となっているが、超高周波帯(10~100GHz)においては、電波減衰等高周波帯固有の課題を克服する必要がある。

将来における超高速大容量無線通信を不便なく利用できる環境の実現に向け、キーデバイスとなる超高安定で小型な高周波クロックをコアとする新規の時刻同期モジュールを開発することにより、次世代通信技術である分散 MIMO 技術と組み合わせ、モバイル環境にて超高周波帯を使えるようにすることを目的とする。

具体的には下記の条件を満足する時刻同期モジュールを制作する。

- 対象周波数帯
- ・ 10GHz~100GHz

研究開発課題		アウトプット指標		アウトカム指標	
高安定な小型高周波クロック素子の作製		<ul style="list-style-type: none"> ・ 周波数安定度 $<10^{-11}$ ・ 発振周波数 >3 GHz ・ 発振器サイズ $<10\text{cc}$ * *新規実装技術を含む	定量	高安定な高周波標準クロックのポータブルな通信アーキテクチャへの適用を実現し、超高周波帯(10~100GHz)の利用効率を高め、周波数の有効利用の一層の向上を促進する。	定性
時刻同期モジュールの作製	外部クロックとの同期技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ 搬送波位相差 $<15^\circ$ ** **ピコ秒オーダーの同期精度 	定量	分散 MIMO システムへの実装を実現し、超高周波帯(10~100GHz)で課題となる電波環境に依存するスループット低下を抑制し、周波数の有効利用の一層の向上を促進する。	定性
	外部クロックの評価技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ 複数の外部クロックの評価機能実装 時刻比較精度 $<10^{-11}$ @1sec. ・ 複数の外部クロックのアンサンブル安定化機能実装 平均時間 1000 秒以上の長期周波数安定度において内部クロック単体に対して、アンサンブル化によって 1 桁以上の改善 	定量	分散 MIMO システムへの実装を実現し、基地局間の同期時刻レベルのハンドオーバーを可能にし、シームレスなサービスを実現することで、周波数の有効利用の一層の向上を促進する。	定性

(2) 事後評価の予定時期

令和 12 年度に事後事業評価を行う予定。

3 研究開発の概要等

(1) 研究開発の概要

・実施期間

令和 8 年度～令和 11 年度（4 か年）

・想定している実施主体

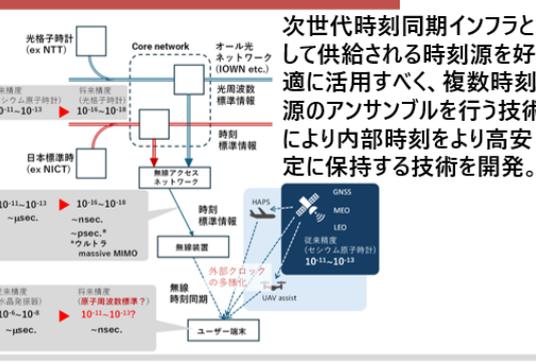
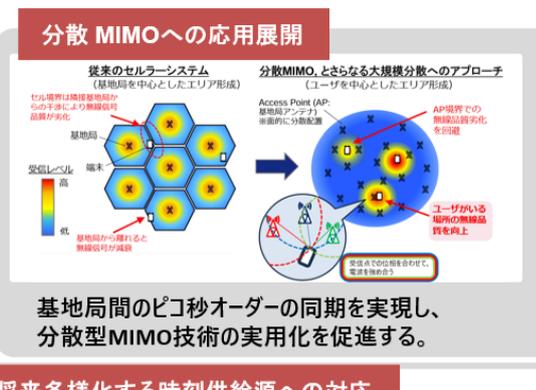
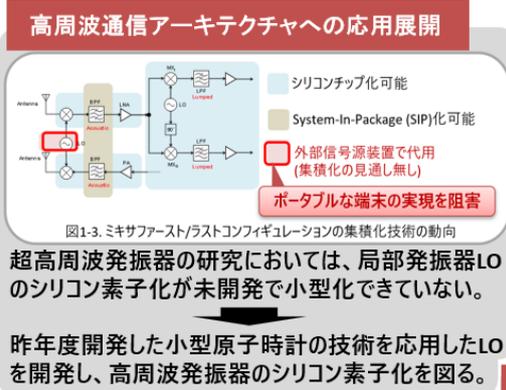
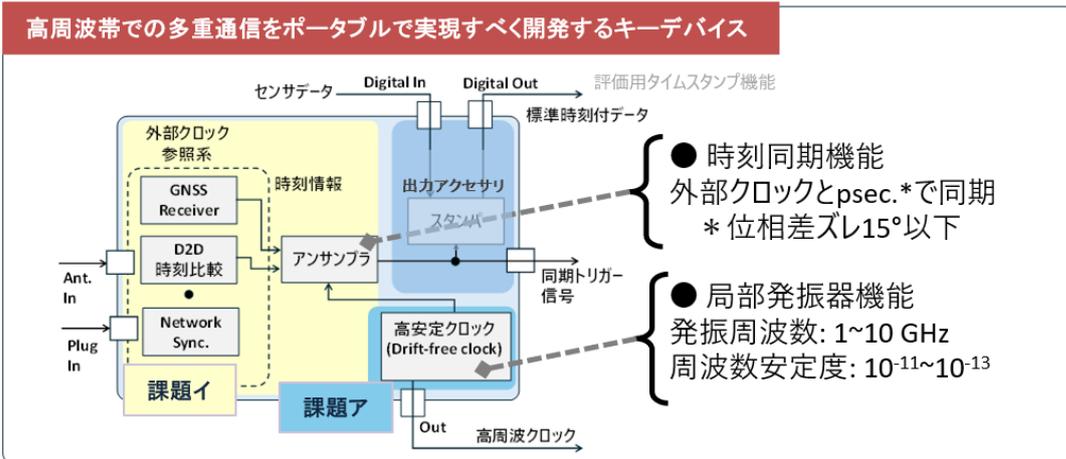
民間企業、大学、国立研究法人等

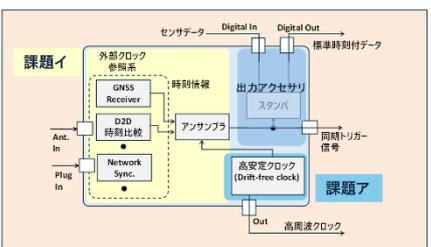
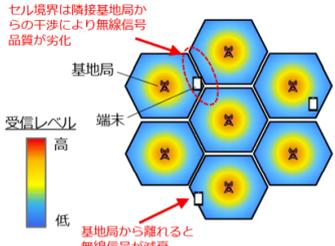
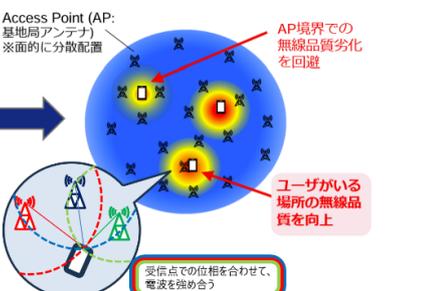
・概要

超高周波帯を活用した高速大容量通信を利用者が不便なく使えるようにするためには、超高周波帯での多重通信をポータブルに実現する素子技術と、超高周波通信固有の電波減衰の課題を克服する分散 MIMO 技術（※）が不可欠であり、これらの開発では、小型集積化が可能な高周波クロックと位相レベルの時刻同期技術の実現が求められる。ここでは、その実現のためのキーデバイスとして、超高安定で小型な高周波クロックをコアとする新規の時刻同期モジュールを提案し、その研究開発を行う。

※分散 MIMO 技術：複数のアンテナを配置してエリアをカバーすることで多方向から見通しを確保するシステム。多数のアンテナ素子によるものを Massive MIMO 技術とよび、さらに大規模なものをウルトラ Massive MIMO 技術とよぶ。

・研究開発概要図



技術の種類	技術の概要																														
<p>高安定な高周波クロックの技術開発</p>	<p>外部クロックの安定度を推定するクロックとして、集積型の安定化された内部クロックの研究開発及び安定化する周波数を GHz 帯とし、現在汎用的とされている水晶を用いた局部発振器 (Local Oscillator:LO) では得られない、センチメートル波・ミリ波帯通信の低位相雑音 LO を実現するための研究開発を行う。現在主流の水晶やセラミックベースでの発振素子では、高周波化に限界があり、周波数通倍による変調精度の劣化が顕著となる。原子スペクトルにより安定化された圧電薄膜共振子発振器による LO により、1024QAM の実現性など、サイズだけでなく品質の有意性が期待できる。(参考文献 1)</p> <p style="text-align: center;">表1-1. 60 GHz帯をターゲットにしたときのLOの選択肢と比較</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th></th> <th>基本発振周波数</th> <th>発振周波数の安定性</th> <th>60 GHz発振に必要な通倍数</th> <th>60 GHzにおけるノイズフロア</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>TCXO</td> <td>温度補償型水晶発振器</td> <td>10~100 MHz</td> <td>△</td> <td>600~6000</td> <td>X</td> </tr> <tr> <td>OCXO</td> <td>恒温槽付き水晶発振器</td> <td>10~100 MHz</td> <td>○</td> <td>600~6000</td> <td>X</td> </tr> <tr> <td></td> <td>圧電薄膜共振子 (MEMS) 発振器</td> <td>1~10 GHz</td> <td>X</td> <td>6~60</td> <td>○</td> </tr> <tr style="border: 2px solid red;"> <td></td> <td>原子スペクトルに安定化された圧電薄膜共振子 (MEMS) 発振器</td> <td>3.417 GHz</td> <td style="text-align: center;">◎</td> <td>≈ 18</td> <td style="text-align: center;">◎</td> </tr> </tbody> </table> <p style="font-size: small;">※原子スペクトルにより安定化する技術はR7年度での研究成果を一部活用することで実現</p>			基本発振周波数	発振周波数の安定性	60 GHz発振に必要な通倍数	60 GHzにおけるノイズフロア	TCXO	温度補償型水晶発振器	10~100 MHz	△	600~6000	X	OCXO	恒温槽付き水晶発振器	10~100 MHz	○	600~6000	X		圧電薄膜共振子 (MEMS) 発振器	1~10 GHz	X	6~60	○		原子スペクトルに安定化された圧電薄膜共振子 (MEMS) 発振器	3.417 GHz	◎	≈ 18	◎
		基本発振周波数	発振周波数の安定性	60 GHz発振に必要な通倍数	60 GHzにおけるノイズフロア																										
TCXO	温度補償型水晶発振器	10~100 MHz	△	600~6000	X																										
OCXO	恒温槽付き水晶発振器	10~100 MHz	○	600~6000	X																										
	圧電薄膜共振子 (MEMS) 発振器	1~10 GHz	X	6~60	○																										
	原子スペクトルに安定化された圧電薄膜共振子 (MEMS) 発振器	3.417 GHz	◎	≈ 18	◎																										
<p>時刻同期モジュールの研究開発</p>	<p>GHz 帯の高安定信号を生成する高周波クロックを実装した時刻同期モジュールを開発し、①近接通信デバイスとのピコ秒オーダーでの時刻同期機能、②GNSS 及び通信網からの標準時刻への同期機能、③集積型の安定化された内部クロックによる外部クロックの安定度推定に関する研究を実施し、内部クロックの長期安定化とともに、ネットワーク全体に対し、同期保持・同期計算コストの低減及び安定化を図る。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="width: 45%;"> <p>高安定な発振器および時刻同期技術を実装した時刻同期モジュール</p>  <p>課題イ</p> <p>課題ア</p> <p>キーデバイスである高精度高安定な局部発振器を外部の高精度な時刻と同期するモジュールにより超高周波帯通信を実現。</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>標準時刻を基準に同期することの有意性</p> <p>基準の有無をオーケストラで例えると</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>増減してもすぐに同期</p>  <p>指揮者 (標準時刻) があるとき...</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>合わせづらい</p>  <p>指揮者 (標準時刻) がいないとき...</p> </div> </div> <p>時刻同期を標準時刻とリンクさせることで、接続する基地局が変化してもウルトラ Massive MIMO の環境をスマートに保持</p> </div> </div>																														
<p>次世代通信技術である分散 MIMO 技術の応用展開 (注)</p>	<p>超高周波帯をモバイル環境で利用するにあたっては、伝搬減衰、シャドウイング、フェージング等の弱点がある。そこで、Beyond5G 技術の一つである分散 MIMO 技術の要素として研究されている基地局同期・連携の技術に対し、本研究により得られる時刻同期モジュールでのピコ秒レベルでのアンサンブル処理による同期技術を組み合わせることにより、伝搬減衰などの3つの課題解決、実用化を促進する。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="width: 45%;"> <p>従来のセルラシステム (基地局を中心としたエリア形成)</p>  <p>セル境界は隣接基地局からの干渉により無線信号品質が劣化する</p> <p>基地局</p> <p>端末</p> <p>受信レベル</p> <p>高</p> <p>低</p> <p>基地局から離れると無線信号が減衰</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>分散MIMOとさらなる大規模分散へのアプローチ (ユーザーを中心としたエリア形成)</p>  <p>Access Point (AP: 基地局アンテナ) ※的に分散配置</p> <p>AP境界での無線品質劣化を回避</p> <p>ユーザーがいる場所の無線品質を向上</p> <p>受信点での位相を合わせて、電波を強め合う</p> </div> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>直進性が高く、減衰の大きい超高周波帯において、分散MIMO/大規模分散MIMOは有用な技術</p> <ul style="list-style-type: none"> 多数(超多数)のアンテナを活用し、シャドウイングに強い 位相面を描えるので、フェージングに強い 多数(超多数)のアンテナが協調して信号を強め合うので、減衰に強い <p>これを実現するには位相差15°以下、すなわちピコ秒レベルの高精度な同期と位相制御が必要である。本研究ではそれを満足する高精度同期モジュールを開発し実用化を促進する。</p> </div> <div style="font-size: small; margin-top: 10px;"> <p>15° × 10-100 GHz ≈ 0.42~4.2ピコ秒</p> <p>出典: KDDI 5G/6Gホワイトペーパー(Ver. 2.0.1版) https://www.kddi-research.jp/tech/whitepaper_35q_5g/assetsets/pdf/KDDI_5G6G_WhitePaper JP_2.0.1.pdf</p> </div>																														

(注) 「次世代通信技術である分散 MIMO 技術の応用展開」は、本件研究開発においては分散 MIMO の実機製造等は予定されていないが、時刻同期モジュールの研究開発の進展により具体的な展開が期待される。

・スケジュール

実施する内容については課題ごとに並行して進め、後年度に組み合わせて成果を上げる。

技術課題ア 超高周波帯での通信をポータブルデバイスで実現する高安定な高周波標準クロックの開発
 技術課題イ 超高周波通信の課題を克服する分散型MIMO技術を実現する時刻同期モジュールの開発

	令和8年度	令和9年度	令和10年度	令和11年度
技術課題ア: 高安定な高周波標準 クロックの開発	ア① 高安定発振器の検討	制御モジュール試作 (水晶ベース)	回路検証 改善試作 課題抽出	改善試作#2 設計環境 改善 改善試作#3
	ア② 新規実装技術の検討	制御モジュール試作 (圧電薄膜(集積型)ベース)		
		原理試作	検証	実装
技術課題イ: 時刻同期モジュール の研究開発	イ① 近接デバイスとの 同期機能集積設計	アンサンブル動作検証	統合検証#1 課題抽出	相互 フィードバック
	標準時刻(GNSS通信網) との同期機能集積			
	内部クロックによる外部 クロックの安定度推定	実証検証	統合検証#2 設計環境 改善	
予算 (単位:百万円)	350	400	400	400

※各課題間は随時成果を互いに反映。また、各システムの規格化・標準化に係る提案活動も実施。

・総事業費(予定)

約 15.5 億円 (うち、令和 8 年度概算要求額 3.5 億円)

(2) 研究開発の必要性及び背景

超高周波帯(10GHz~100GHz)の活用は周波数資源拡大の観点から極めて重要であり、多くの研究開発が進捗している。特に近年では、未使用の周波数帯の開拓のみならず、当該周波数帯においても従来の周波数帯と同等の利便性をシームレスに実現することが求められており、このため、10~100GHz の超高周波帯にて多値通信を、電波減衰を気にすることなく円滑に活用できる環境を構築し、モバイル通信での利用レベルにおいて、高い周波数利用効率を実現する必要がある。

特に、超高周波帯通信に向けた無線端末と無線基地局における技術開発においては、ともに高安定なクロック(発振器)開発がキーとなっており(※)、これらを連動させて研究開発を進めることにより、超高周波帯での超多値通信の実現と、当該通信を実用レベルに安定してユーザに提供する環境の醸成とを並行して実現できる。これは、周波数利用帯域の拡大と、周波数利用効率の拡大を同時に推進させ、さらにその社会実装を効率的に実現することを意味するものである。

一方、モバイル通信システムへの超高周波通信モジュールの実装には、超高周波発振の安定化技術及び集積化技術への課題、通信アーキテクチャにおいて、伝搬減衰が大きいなど、モバイル通信を実現する上での課題があり、技術的課題解決が必要である。そのためには、超高周波帯での多重通信をポータブルに実現する素子技術と、超高周波通信固有の電波減衰の課題を克服する分散 MIMO 技術が不可欠であり、これらの開発では、小型集積化が可能な高周波クロックと位相レベルの時刻同期技術の実現が求められる。ここでは、その実現のためのキーデバイスとして、超高安定で小型な高周波クロックをコアとする新規の時刻同期モジュールを提案し、その研究開発を行う必要がある。

無線通信システムを超高周波通信に対応させ、従来の通信帯域での通信と同様のサービスをシームレスに実現しようとした場合、技術横断的な設計・試作・評価環境が必要となり、関係機関も多岐に渡ることから、国の指導の下での研究開発が望まれる。

6G の立ち上がりを 2030 年度に控え、すでに ITU-R、3GPP では 6G システムの議論が昨年度より開始されており、超高周波通信の通信機開発では我が国でも先進的な開発が進捗していることも踏まえ、当該分野にて社会実装を早期に成し遂げ、我が国のプレゼンスを確保していくためにも、本年

度からの優先的な研究開発の開始が必須である。また、現在周波数はひっ迫した状況にあり、周波数のひっ迫を解消するためにも早急に本研究開発を実施することが必要である。

※無線端末と無線基地局における技術開発における高安定な発振器の重要性

<無線端末における技術開発>

超高周波帯の通信アーキテクチャにおいて、我が国はシリコン CMOS 技術を用いたミリ波帯の送信器チップを世界に先駆けて報告している(参考文献2)。しかし、当該回路では、局部発振器(L0)に関して通倍回路^{*注}の集積化に留まり(*注 通倍：発振周波数に所望の数値を乗算して高い周波数を出力する処理)、通倍される原振は高安定な外部の発振装置を用いている。この傾向は他のミリ波通信用のチップ開発でも同様であり超高周波帯の有効活用に資するポータブルな送受信器の開発では、高安定な原振と通倍回路とを一体集積化したL0の開発がキーとなる。

従来の GHz 帯の無線通信では、10MHz~100MHz 帯の水晶発振器を原振として、この周波数を 10~100 倍して L0 としている。この方式を超高周波帯 (10GHz~100GHz) へそのまま適用しようとする、周波数を 100~10,000 倍する必要がある、ノイズフロアの劣化が避けられない。特に多値通信では、ノイズフロアの劣化が変調精度に影響を及ぼし、より深刻な問題となる。

この通倍数を抑制する手法として、水晶より高い周波数で動作が可能な MEMS 共振器や圧電薄膜の共振子の活用が望ましいが、MEMS や圧電薄膜の共振子は水晶と比較して、製造上のバラツキや温度特性に課題があり、その適用は新たな技術開発を必要とする。本研究ではこれらの高周波共振器を、原子スペクトルを用いて安定化し、超高周波通信機の L0 の原振への適用を試みる。これにより、例えばルビジウムの超微細構造遷移に基づく原子スペクトルを活用すれば、3 GHz 帯の安定した周波数を得ることが可能となり、60GHz 帯の通信でもわずか 20 通倍で必要な L0 を得ることができる。本手法は、すでにシステムシミュレーションを用いて、60GHz 帯にて 1024QAM の多値通信が実現可能であることが示されており、超高周波帯での超多値化に新たな展望を与えている。

なお、原子(ルビジウム)スペクトルの吸収線を活用して、圧電薄膜共振子発振器を安定化する試みは、令和4~7年度に電波資源拡大のための研究開発として実施された「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」にて実績があり、当該研究開発の成果を有効活用することが可能である。

60GHz 帯の超高周波帯において、1024QAM のような超多値通信が実現できれば、周波数の利用効率を帯域拡大と相乗させて大幅に高めることができる。

<無線基地局における技術開発>

超高周波帯では電波の直進性が高まり、シャドウイングやフェージングの克服も含め、伝搬減衰への対策が求められる。この課題に対し、多数の基地局を協調させて電波を送受信する分散 MIMO の技術が注目されている。

分散 MIMO においてキーとなるのが基地局間の時刻同期である。複数の基地局が協調して電波を送信する場合、端末において各基地局からの電波の波面が十分に揃っている必要があり、超高周波帯(10GHz~100GHz)帯において必要とされる時刻同期精度はピコ秒オーダーに達する($\frac{15}{360} \times \frac{1}{10-100 \text{ GHz}} \approx 0.42 \sim 4.2 \text{ psec.}$)(参考文献3)。従来の基地局がマイクロ秒からナノ秒オーダーの同期精度で動作していることに鑑みれば、ピコ秒オーダーの高精度な同期は新たな技術開発を必要とすることが理解される。当該開発において、全ての基地局の同期精度をピコ秒オーダーに引き上げる必要はない。受信端となる端末を中心に、電波の見通しの良い基地局をピックアップし、当該端末における各基地局からの電波の位相情報を測定した上で、選択された基地局間の位相ズレを概算し、その結果を元に、基地局間で同期処理を精緻に行い、ローカルにピコ秒オーダーの同期を実現する。本研究では、この基地局間の精緻な同期プロセスを実現するための専用モジュールの開発を目指す。

通信プロトコルとして確立されたピコ秒オーダーの同期は通信が終了するまで、ロバストに維持されなければならない。この観点では車両中での端末利用や、ドローン及び自動運転車両の無線制御など、端末からの見通しエリアに存在する基地局の構成が連続的に変化することも想定しておく必要がある。言い換えれば、時刻同期のハンドオーバー性能が必要である。先に述べた時刻同期のプロセスでは、選択された基地局間での相対的な同期だけに着目していた。これを標準時刻と紐付けることができれば、新たな基地局が追加されても、時刻同期状態をハンドオーバーすることが容易となる。

標準時刻への基地局のリンクは従来、GNSSに強く依存していた。しかし、近年のGNSSの脆弱性への指摘から、ファイバー網から光格子時計を一次標準とする高精度な時刻配信が検討されており(参考文献4,5)、衛星からの時刻配信も低・中軌道衛星(LEO and MEO satellites: Low and Medium Orbit satellites)の普及や、UAV(Unmanned Aerial Vehicle)、HAPS(High Altitude Platform Station)等の援用も可能となって来ており、複数の時刻源を平均化処理(正確には各時刻源の信頼度に基づいて重み付けの最適化を行うアンサンブル処理)して、標準時刻をシステム内部で安定に保持する事が可能となって来ている。そして、この平均化処理は、システム内部への安定なクロックの搭載によって、外部クロックの安定度判別をも可能にし、ジャミングやスプーフィング等の第三者からの攻撃に対してセキュアでレジリエントな時刻同期システムの構築を可能にする。このような背景技術を取り込むことで、高精度な標準時刻への同期を極めて安定して実現することが可能となり、先に述べた時刻同期状態のハンドオーバーも安定して運用することが可能となる。

(3) 政策的位置付け

○関連する主要な政策

V. 情報通信 (ICT 政策) 政策9「情報通信技術の研究開発・標準化の推進」

○政府の基本方針(閣議決定等)、上位計画・全体計画等

名称(年月日)	記載内容(抜粋)
デジタル変革時代の電波政策懇談会(令和4年度フォローアップ第2回)(令和4年12月9日)	「資料2-2-1 携帯電話用周波数の再割当てに係る円滑な移行に関するタスクフォース 報告書」P.31(抜粋)「周波数再編アクションプラン(令和4年度版)(案)において、2025年度末までの目標として、4.9GHz帯、26GHz帯、40GHz帯などの6GHz幅を新たに携帯電話用に割り当てることを掲げているが、総務省は、携帯電話が多くの国民が利用している周波数利用効率の高い無線システムであることを踏まえ、周波数再編アクションプランに掲げられた周波数に限らず、携帯電話用周波数の更なる確保に向けた検討を進めることが必要である。
「AI社会を支える次世代情報通信基盤の実現に向けた戦略 - Beyond 5G 推進戦略 2.0 -」(令和6年8月30日)	(3) 無線アクセスネットワーク(RAN)分野 ②トラヒック需要の拡大に対応した周波数確保(抜粋) ・ITU-Rにおいて国際移動通信システム(IMT)に利用することが特定された周波数帯(24.25~27.5GHz、37~43.5GHz、47.2~48.2GHz、66~71GHz)の国内における割当て可能性について検討する。また、WRC-27において審議予定のIMT候補帯域(4.4~4.8GHz、7.125~8.4GHz、14.8~15.35GHz)について国際標準化や社会実装といったことも十分に意識しながら共用検討に積極的に貢献するとともに、WRC-31以降のIMT候補帯域に関する国際的な議論に貢献し、IMT用周波数の拡大に向けた取組を推進する。
周波数再編アクションプラン(令和6年度版)(令和6年12月13日)	第1章 背景・目的(抜粋) 電波利用システムは、今後も国民の日常生活や我が国の社会経済活動における重要な基盤であり続けることから、高まる電波利用ニーズや新たな技術動向等に対応するためには、新たに割り当てることのできる電波を確保することも必要であるが、有限希少な国民共有の資源である電波の更なる有効利用や異なる無線システム間での共用を図ることの重要性がますます増大していくものである。 1. 概要(抜粋) 社会の幅広い分野で電波の利用が進み、周波数がひっ迫する中で、我が国の稠密な周波数利用状況を踏まえ、①周波数を効率的に利用する技術、②周波数の共同利用を促進する技術及び③高い周波数への移行を促進する技術という3つの分野を柱とした研究開発を着実に実施していく必要がある。

4 政策効果の把握の手法

(1) 事前事業評価時における把握手法

本研究開発等の企画・立案に当たっては、外部専門家・外部有識者から構成される「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和7年7月22日）において、研究開発等の必要性、有効性、技術、実施体制及び予算額の妥当性、研究開発の有益性等について外部評価を実施し、政策効果の把握を行った。

(2) 事後事業評価時における把握手法

本研究開発終了後には、外部専門家・外部有識者から構成される「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」において、目標の達成状況や得られた成果等、実施体制の妥当性及び経済的効率性、実用化等の目途等について外部評価を実施し、政策効果の把握を行う。

5 政策評価の観点及び分析

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	上記、3（2）研究開発の必要性及び背景に記載のとおり。
効率性	<p>本研究開発は、未利用周波数帯への移行促進のためには、これまで利用が進んでいない高い周波数帯の無線信号の高精度測定のための要素技術の開発が必要不可欠であり、他の効率的で質の高い代替手段はない。</p> <p>専門的知識や研究開発遂行能力を有する企業、研究者等のノウハウを積極的に活用することとしており、効率的に研究開発を推進することが期待されるため、投資に対して最大の効果が見込まれる。</p> <p>また、予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了後における、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施することとしている。</p> <p>よって、本研究開発には効率性があると認められる。</p>
有効性	<p>超高周波帯での多重通信をポータブルに実現する素子技術について、我が国では無線端末技術においてミリ波帯の送信機のシリコン CMOS 技術を用いたミリ波帯の送信器チップを世界に先駆けて報告しているが、局部発振器素子（LO）の集積化には至っておらず、モバイル端末実装への阻害要因となっている。LO の集積化を実現することで、ミリ波帯送信器全体の小型化が見込まれ、モバイル端末実装が実現することが可能となる。なお、LO については、原子時計にて培った超安定化技術を応用するため、従来の LO と比較して高い品質を得ることが可能である。システムシミュレーションにより、本手法を用いた 60GHz 帯にて 1024QAM の多値通信が実現可能であることが示されており、周波数利用効率を高めることができる。</p> <p>また、超高周波通信固有の電波減衰の課題を克服する分散 MIMO 技術については、上記の高安定高周波クロック技術を基礎にした時刻同期技術によりピコ秒オーダーでの同期が見込まれ、次世代通信技術である分散 MIMO 技術の実用化促進へ貢献することが可能である。</p> <p>本研究では、時刻同期技術実現のためのキーデバイスとして、超高安定で小型な高周波クロックをコアとする時刻同期モジュールを新たに開発することで、上記技術の実用化に向け貢献するとともに、世界に先駆ける技術の創出・普及に寄与することができる。</p> <p>よって、本研究開発には有効性があると認められる。</p>
公平性	<p>未利用周波数帯への活用に大きく寄与するものであることから、広く無線局免許人や無線通信の利用者の利益とすることが見込まれる。</p> <p>また、本研究開発の実施に当たっては、開示する基本計画に基づき広く提案公募を行い、提案者と利害関係を有しない複数の有識者により審査・選定する予定である。</p> <p>よって、本研究開発には公平性があると認められる。</p>
優先性	6G の立ち上がりを 2030 年度に控え、すでに ITU-R、3GPP では 6G システムの議論が昨年度より開始されている。

超高周波通信の通信機開発では我が国でも先進的な開発が進捗しており、当該分野にて社会実装を早期に成し遂げ、我が国のプレゼンスを確保していくためにも、本年度からの優先的な研究開発の開始が必須と考える。

よって、本研究開発には優先性があると認められる。

6 政策評価の結果（総合評価）

社会の幅広い分野で電波の利用が進み、周波数がひっ迫する中で、我が国の稠密な周波数利用状況を踏まえ、モバイル通信システムの周波数のひっ迫解消や有効利用を一層促進するために、超高周波帯への拡大に向けた取組の推進が必要である。

モバイル通信システムへの超高周波通信モジュールの実装には、超高周波発振の安定化技術及び集積化技術への課題、通信アーキテクチャにおいて、伝搬減衰が大きいなど、モバイル通信を実現する上での課題があり、技術的課題解決が必要である。

本研究開発においては、令和4～7年度に電波資源拡大のための研究開発として実施された「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」での研究開発成果を活用した原子スペクトルの吸収線を用いた圧電薄膜共振子発振器を安定化する技術を応用し、高安定で高精度な高周波クロックを実装し集積化を図る。さらに、この高精度クロックと外部のクロックとを同期する技術を実装したモジュールを開発する。本モジュールを用いたピコ秒オーダーでの高精度な同期の実現と、次世代通信技術である分散 MIMO 技術とを組み合わせ、モバイル通信における超高周波特有の電波減衰などの技術課題を克服し、超高周波帯域の利用拡大を促進する。またシミュレーションを用いて、60GHz 帯においては 1024QAM の多値通信が実現可能であることが示されており、周波数利用効率を高めることができる。

よって、本研究開発には必要性、有効性等があると認められることから、本事業を実施することは妥当である。

7 政策評価の結果の政策への反映方針

評価結果を受けて、令和8年度予算において、「ミリ波帯等における移動通信システムの展開に関する研究開発」として所要の予算要求を検討する。

8 学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和7年7月22日）において、本研究開発の必要性、有効性、技術の妥当性、実施体制の妥当性、予算額の妥当性、研究開発の有益性等について外部評価を実施し、「6G以降のミリ波・サブテラヘルツ帯などの高周波数帯域での伝送に求められる重要技術である」、「分散 MIMO の構築には基地局間の精緻な時刻同期が不可欠である」等の御意見を頂き、本研究開発を実施する必要性が高いこと、効率性及び有効性等が確認された。このような有識者からの御意見を本評価書の作成に当たって活用した。

9 評価に使用した資料等

- 参考文献1：60GHz帯の多値通信に関して、TCXO(Temperature Compensated X-tal Oscillator:温度補償型水晶発振器)とOCXO(Oven-controlled X-tal Oscillator: 恒温槽付き水晶発振器)をL0の原振に採用した場合と、圧電薄膜共振子発振器を原子の吸収スペクトルで安定化した素子をL0の原振に採用した場合の通信性能を、システムシミュレーションを用いて比較。
M.Hara, Y. Yano, T. Ido, H. Ito, T. Nishizawa, M. Ueda, “Impact of FBAR Oscillator Stabilized to the CPT Resonance as Local Oscillator of Millimeter-Wave Communications,” In Proc. 2023 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 03-08 September 2023, Montreal, QC, Canada (2023)

- 参考文献 2 : 当該通信アーキテクチャの開発において、すでに先駆的な研究開発が我が国にて進捗しており、サブ THz 帯の送信機をシリコン集積回路で実現する提案が成されている
C. Wang, H. Herdian, W. Zheng, C. Liu, J. Mayeda, Y. Liu, O. A. Yong, W. Wang, Y. Zhang, C. da Gomez, A. Shehata, S. Kato, I. Abdo, T. Jyo, H. Hamada, H. Takahashi, H. Sakai, A. Shirane, K. Okada, “A 236-to-266GHz 4-Element Amplifier-Last Phased-Array Transmitter in 65nm CMOS,” In Proc. 2024 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), 18-22 February 2024, San Francisco, CA, USA (2024)
- 参考文献 3 : 劣化のない基地局連携を実現するには、基地局間の搬送波の位相差を 15° 以内に抑制する必要がある。
J. M. Palacios, O. Raaes, M. Valkama, “Impact of Channel Non-Reciprocity in Cell-Free Massive MIMO,” IEEE Wireless Communications Letters, 9(3), pp.344-348, 2020
- 参考文献 4 : 近年の標準時刻のステアリングへの光格子時計の採用
プレスリリース「NICTの光格子時計が史上最高精度で協定世界時の1秒の正確さを評価」
<https://www.nict.go.jp/publicity/topics/2022/04/22-1.html>
- 参考文献 5 : 近年の標準時刻のステアリングへの光格子時計の採用
“Record number of frequency standards contribute to International Atomic Time”
<https://www.bipm.org/en/-/2021-12-21-record-tai>

以下、3 研究開発の概要等 (3) 政策的位置付け にて引用した資料を以下に示す。

- 資料 2 - 2 - 1 携帯電話用周波数の再割当てに係る 円滑な移行に関するタスクフォース 報告書
https://www.soumu.go.jp/main_content/000849434.pdf
- AI 社会を支える次世代情報通信基盤の実現に向けた戦略 - Beyond 5G 推進戦略 2.0 - (令和 6 年 8 月 30 日)
https://www.soumu.go.jp/main_content/000965078.pdf
- 周波数再編アクションプラン (令和 6 年度版) (令和 6 年 12 月 13 日)
https://www.soumu.go.jp/main_content/000981646.pdf