令和７年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：総合通信基盤局 電波部 基幹・衛星移動通信課 基幹通信室
評価年月：令和７年８月

１ 政策（研究開発名称）

無線・光相互変換による超高周波数帯大容量通信技術に関する研究開発

２ 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

・実施期間

令和３年度～令和６年度（４か年）

・実施主体

民間企業、大学、国立研究開発法人

・総事業費

1,583 百万円

令和３年度	令和４年度	令和５年度	令和６年度	総　額
350 百万円	339 百万円	442 百万円	452 百万円	1,583 百万円

事業開始時点で、十億円以上の費用を要することが見込まれていなかったため、事前評価は実施していない。

・概　要

350-600GHz 帯を利用した無線伝送基盤技術を確立し、100m 以上の距離で 200Gbps 超の伝送容量、100μs 程度の遅延といった、超大容量低遅延無線伝送技術を実現するため、下記３技術課題を連携して実施する。

技術課題ア　テラヘルツ帯 RF 技術
- 350-600GHz 帯で動作可能な動作回路を基本要素とし、光ネットワークからの信号を直接無線信号に変換する化合物半導体チップを開発する。

技術課題イ　光電気相互変換技術
- 低位相雑音かつ高い基本発振周波数を有する光電気発振技術を基盤とし、光信号とミリ波・テラヘルツ信号を効率的に相互変換する技術の研究開発を行う。

技術課題ウ　テラヘルツ波・ミリ波統合ネットワーク
- テラヘルツ波とミリ波を組み合わせることにより、高い可用性を有する無線ネットワーク技術の研究開発を行う。
- 課題ア～ウの技術を組み合わせた統合システムの構築を行い、屋内又は地下空間におけるシステム実証試験を実施する。

本技術の利用を通じて、5G における無線フロントホール・バックホールに使用する周波数帯を、5G で利用が想定されるマイクロ波・ミリ波よりも高い周波数帯に移行することにより、将来のマイクロ波・ミリ波の周波数ひっ迫を緩和する。

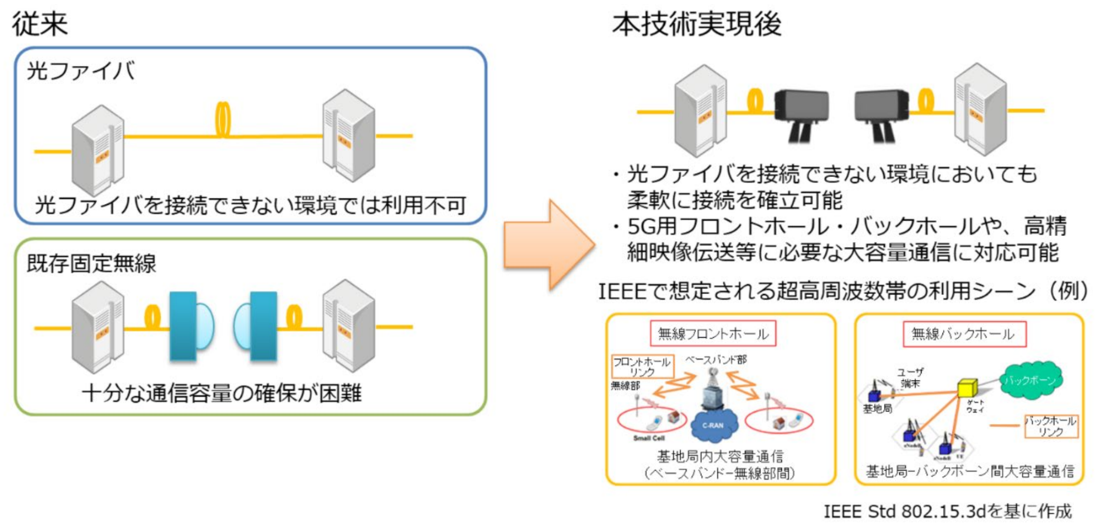


図　研究開発イメージ図

技術の種類	技術の概要
テラヘルツ帯 RF 技術	搬送波周波数が 500GHz の無線信号を送受信するためのテラヘルツ帯集積回路を開発するための技術開発を実施する。 極めて周波数が高く波長が短い信号を扱う場合は、市販の計測設備を導入するだけでは目的とする評価が実施できないという課題がある。そのため、専用の設計環境・計測環境を構築するとともに、送受信化合物集積回路等の増幅器、混合器、逓倍器などの要素回路技術を実現する。最終的には、要素回路を組み合わせた送信段の出力電圧 0dBm（導波管端）以上及び送受信帯域幅 50GHz の無線システムを構築する。
光電気相互変換技術	テラヘルツ帯の無線システムを実現するためには位相雑音の優れた信号源が必要となる。そのため、高品質な超高周波光電気信号を直接生成可能なマイクロ光コムを核とした光電気発振技術の実現を目指す。 具体的には光領域で高性能化が進んでいる「マイクロ光コム」による低位相雑音のテラヘルツ波の生成を実現するために、以下の技術の確率を目指す。 1. 周波数間隔 350～600GHz のマイクロ光コムを用いた周波数逓倍を必要としない低位相ノイズ超高周波光電気信号発生技術 2. マイクロ光コムのモード間隔に等しい周波数と低位相ノイズを有するテラヘルツ波信号が発生可能な光／テラヘルツ変換技術 3. テラヘルツ波の伝送信号情報を光キャリア信号に重畳可能なテラヘルツ／光変換技術 4. オール光型テラヘルツ発生及び検出の特徴を活かしたテラヘルツ変復調技術 これら 4 つの課題と並行して、マイクロ光コム技術による信号生成は、直近では無線機に実装するための信号電力が十分でない可能性があるため、光電気変換により 60GHz の低位相雑音信号を生成する技術の開発も目指す。
テラヘルツ波・ミリ波統合ネットワーク	テラヘルツ帯の伝送システムではその伝送特性が雨や風などの天候の影響を受けやすく受信電力が条件によっては充分得られないという課題がある。高いゲインのアンテナが比較的容易に実現できるという特徴がある反面、最大利得を満たす方向から僅かでもアンテナの方向性にズレが生じると、所要のアンテナ利得が得られないため、アンテナの方向制御の高精度化が必要となる。 このため降雨減衰や風によるアンテナ方向性の揺らぎなど天候の影響を考慮に入れた伝送システム設計や、ビーム制御、複数帯域の同時使用、システム評価のための広帯域中間周波数帯技術の実現を目指す。 更に光信号から OOK 方式の無線通信に適した信号処理を行うための信号波形処理インタフェースを実装する。

・スケジュール

技術の種類	令和３年度	令和４年度	令和５年度	令和６年度
超高周波数帯無線通信技術	一次試作	二次試作	統合試験（I）	統合試験（II）
光電気発信器による帯域変換技術	一次試作	回路モジュール化	二次試作	実証実験
ミリ波統合ネットワーク技術	一次試作	二次試作	制御設備試作	無線システムの検証

（2）達成目標

5G の進展に伴い、莫大な数の小型の基地局の設置が必要となり、その接続リンク（フロントホール）の必要容量も激増することが想定される。また、スモールセルの多用が見込まれる中、全てを光ファイバで接続することが地理的・コスト的に困難であるため、設置が容易で 200Gbps を超える伝送レートが確保可能な無線通信技術の研究開発が急務である。

しかしながら、実用化が進んでいる 100GHz 以下のミリ波帯や研究開発が盛んに行われている 300GHz 帯（周波数特定されている帯域）では周波数帯域が足りず 200Gbps を超える伝送レートを実現することは困難である。

本施策では、これまで利用が進められてきていない超高周波数帯（350～600GHz）における無線技術及び光ファイバ信号との相互変換技術の研究開発を実施し、固定無線通信システムの超高周波数帯への移行の促進を通じた周波数の有効利用を図る。また、国際競争力の強化を実現するため、ITU や APT をはじめとした国際標準化に関連する国際機関への標準化提案を継続して実施する。

○関連する主要な政策

Ⅴ．情報通信（ICT 政策）　政策 13「電波利用料財源による電波監視等の実施」

○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）
Beyond 5G 推進戦略-6G へのロードマップ-（令和２年６月 30 日）	超高速・大容量といった 5G が有する特長の更なる高度化に加えて、自律性や拡張性といった新たな機能を実現するには、テラヘルツ波や光・量子、AI 等の非連続な飛躍的進化を可能とする先端技術を含む無線技術、ネットワーク技術、省エネ技術、セキュリティ技術、そして、これらの基盤となるソフトウェア関連技術等の開発・高度化・標準化が不可欠である。
デジタル時代の新たなＩＴ政策大綱（令和元年６月７日）	【２つめの柱】官民のデジタル化の推進において「なお、「５Ｇの次」も視野に入れ、新たな要素技術に関する研究開発や、その円滑かつ迅速な社会実装の観点から、実世界の電波伝搬を模擬する試験環境に関する研究開発を推進する。また、産業・ビジネス創出に寄与する産学連携等を同時並行で進めることとする。

（3）目標の達成状況

４年間の研究開発を通じて、350-600GHz 帯を利用した無線伝送基盤技術を確立し、100m 以上の距離で 200Gbps 超の伝送容量、100μs 程度の遅延といった、超大容量低遅延無線伝送技術を実現するための基盤技術を確立した。各技術課題の達成状況は下記の通りである。

技術の種類	目標の達成状況
テラヘルツ帯 RF 技術	テラヘルツ帯 RF 技術の研究開発では搬送波周波数 500GHz の無線信号を送受信するためのテラヘルツ帯集積回路を開発するため下記の項目を実施した。 ①デバイスモデリング及び評価技術 ②集積化モジュール及び無線通信装置の設計技術 ①ではテラヘルツ帯の信号評価システムと実測に基づくデバイスモデリングを実施して

設計環境を構築した。
②では並行して搬送波周波数 500GHz、帯域幅 50GHz の送受信化合物集積回路を増幅器、混合器、逓倍器などの要素回路を組み合わせて実現した。
また最終年度には無線システムとしてのシステム実証を行い、送信段の出力電力 0dBm（導波管端）以上（送信アンテナ利得 53dBi 想定時）及び送受信機帯域幅 50GHz を実現した。

①デバイスモデリング評価技術

搬送波 500GHz 以上、帯域幅 50GHz 以上に対応する化合物半導体 MMIC の試作評価を行うため、本開発では、半導体の製作にはファウンドリーサービスを利用し、Fmax の高い InP_HEMT プロセスを採用した。選択したプロセスにて試作した半導体素子について、DC 特性と AC 特性を評価し、計算値と実測値はほぼ同様の特性傾向を示していた。

図　構築した MMIC 評価システム

MMIC の評価には上図のベクトルネットワークアナライザと外部バイアス電源システムにて MMCI 評価システムを構築した。これによりテラヘルツ波帯の 220GHz～1100GHz の範囲にて MMIC の評価を可能とした。

②集積化モジュール・無線通信装置の評価技術

化合物半導体 MMIC を用いて集積化モジュールを実現することは、無線通信装置の組み立て、装置内部の回路系統の評価を効率的に行うために必要な過程である。MMIC は単体での性能評価は困難であるため下図に示すように、MMIC 単体実装評価用パッケージに実装しスカラー評価系統で MMIC 単体評価を行った。

図　MMIC 単体評価例

設計した性能が得られたのちにバイアス電源供給回路を設計し MMIC と共に MMIC モジュール用実装パッケージに実装した。下図に開発した集積化及びモジュールに実装したバイアス回路を示す。

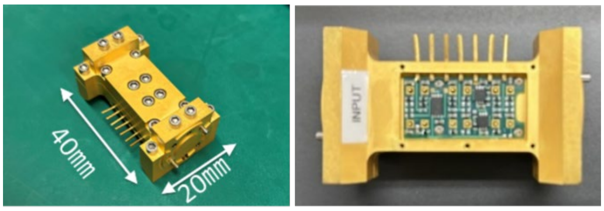


図　モジュール写真とバイアス回路

集積化モジュールの出力電力帯周波数特性を下図に示す。500GHz 帯の周波数は、局発信号が約 58GHz であり 9 倍となる 520GHz を搬送波として出力電力特性を評価した。出力電力は目標値である 500GHz 帯で 0dBm を達成し、50GHz 以上の帯域幅も確認できた。このことから 500GHz 以上の搬送波にて帯域幅 50GHz で 0dBm の無通信装置の開発を達成した。

<table>
<tr>
<td></td>
<td>

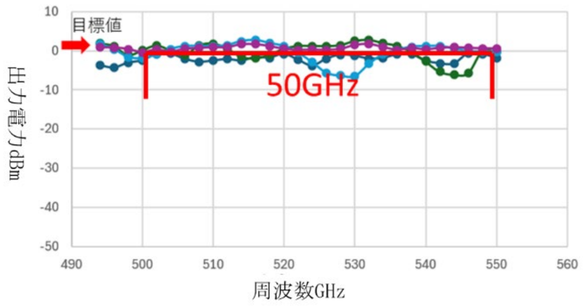


図　出力電力対周波数特性

</td>
</tr>
<tr>
<td>マイクロ光コムによるテラヘルツ信号発生技術</td>
<td>

高品質な超高周波光電気信号を直接生成可能なマイクロ光コムを核とした光電気発振技術を実現するため、以下の４課題を実施した。

①マイクロ光コムを用いた超高周波光電気信号発生技術

周波数逓倍を必要としない新たな超高周波・低位相ノイズな光電気信号発生手段として、半導体プロセス技術と親和性の高い構成によりマイクロ光コムを活用する手法を検証した。

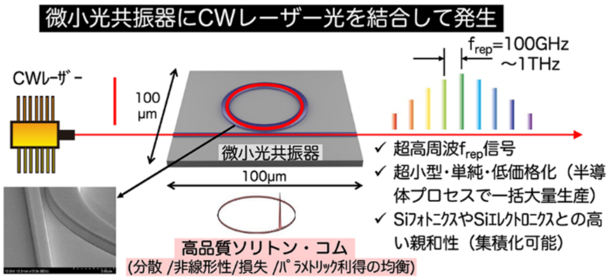


図　マイクロ光コム

具体的には、Si_3N_4リング型微小光共振器（Q ≈ 10^6）を基盤としたマイクロ光コム発生装置を開発した。まず、FSR=560 GHz の微小光共振器を用い、ソリトンマイクロ光コムを発生させた。下図に示すように、得られた光スペクトルは、ソリトンマイクロ光コム特有の $sech^2$型スペクトル形状を呈し、560 GHz 間隔で等間隔に並ぶ光周波数モード列と広帯域なスペクトル帯域を有している。また、テラヘルツ帯 RF 技術との周波数接続の可能性を検討するため、低 f_{rep}マイクロ光コムの実現可能性を検証した。こちらにおいても、下図 2(b)に示すように、安定なソリトンマイクロ光コムの発生に成功した。

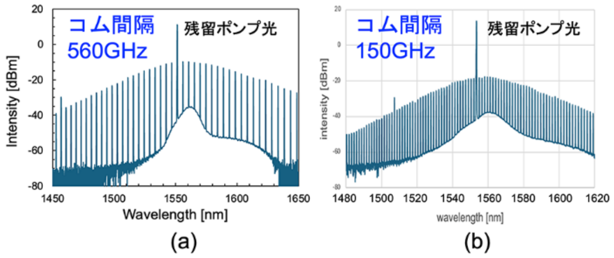


図　ソリトンマイクロ光コムの光スペクトル

(a) f_{rep}=560GHz と (b) f_{rep}=150GHz

②-(a)　オール光型テラヘルツ発生技術

マイクロ光コムのフォトミキシングを用いて THz 波を発生させた（下図(a)）。具体的には、マイクロ光コムの隣接 2 モードをバンドパスフィルターにより選択的に抽出し、時間領域において光ビート信号を生成する。この光信号を単一走行キャリア・フォトダイオード（UTC-PD）に入力することで、光ビート信号の包絡波成分を電気信号として取り出し、THz 帯に位置する高周

</td>
</tr>
</table>

波電波として出力した。下図(b)は、f_{rep}の低位相ノイズ化制御の有無によるTHz 波の位相ノイズスペクトルの比較を示している。低位相ノイズ化制御を施すことで、10kHz オフセットにおいて-100dBc/Hz の極めて低い位相ノイズ特性が得られることを確認した。下図(c)は、低位相ノイズ化制御時におけるf_{rep}信号と THz 波の位相ノイズスペクトルの比較を示している。これは、マイクロ光コム f_{rep}信号の超低位相ノイズ特性が、フォトミキシングを経ても損なわれることなく THz 波側に忠実に転送されていることを示しており、本手法が高品質な THz 信号として有効であることを意味している。

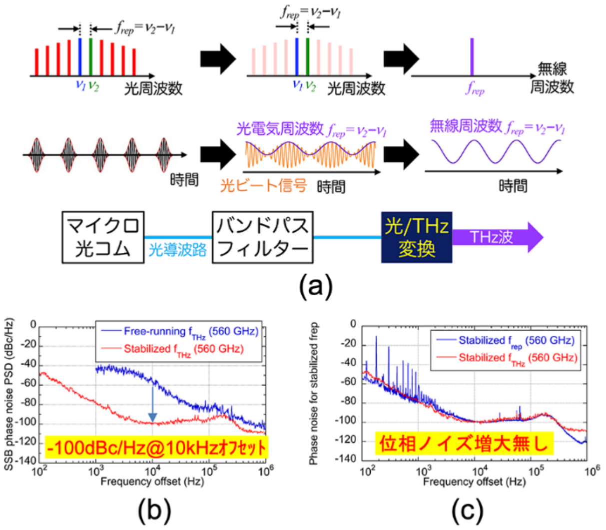
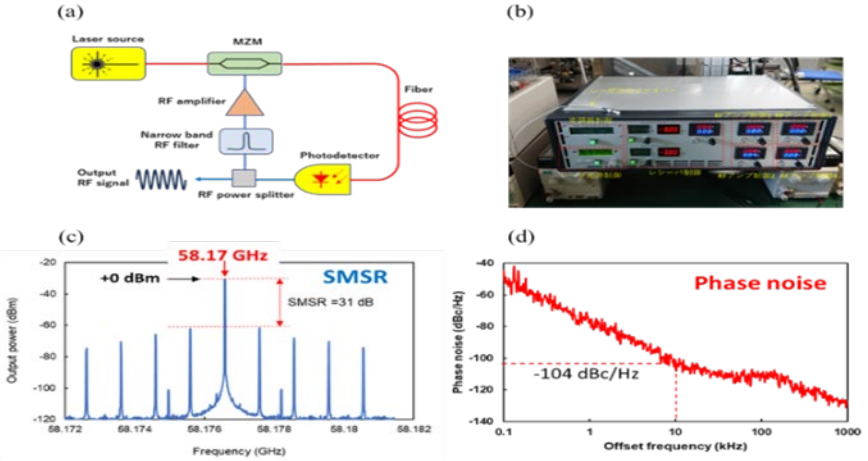


図 (a)フォトミキシングの原理と(b)THz 波の位相ノイズスペクトル

②-(b) 60GHz 帯電気光発振器の開発

500GHz 帯の高 SN・THz 波信号発生のため、50-60GHz 信号を 9 逓倍する手法を確立するため、低雑音性に優れると考えられる 50-60GHz 帯の光電気発振(Optoelectronic oscillator; OEO)の開発を行った。OEO システムの性能向上及び小型化をすすめ、60GHz 帯で動作可能な低ノイズ、低駆動電圧型マッハツェンダ変調器、60GHz 帯集積型高変換利得光検出器デバイス、狭線幅半導体レーザの開発を行うとともに、光源、光変調器、光検出器を組み込んだ OE 発振装置の設計・試作・評価を行った。図 2-2-8 (a) に代表的な OE 発振器構成を示す。光源、光変調器、光検出器を組み込んだ集積型モジュールの外観が図 2-2-8 (b) となる。このモジュールを発振動作させた際の電気スペクトルが図 2-2-8 (c) である。58GHz 帯での発振が得られており、9 逓倍した際に 500GHz 帯のテラヘルツ帯が得られることが分かり、設計通りの光電気発振器の動作が確認された。また、このスペクトル中心の位相ノイズを測定した結果が図 2-2-8 (d) である。目標であった 10kHz オフセット周波数で-100dBc/Hz を下回るノイズ特性が得られており、低雑音の 50-60GHz 帯発振器を実現した。



図（a）58GHz 帯光電気発振器の構成図、（b）作製した集積型電気光発振器モジュール、（c）発振動作時の電気スペクトル、（d）位相ノイズスペクトル

③オール光型テラヘルツ検出技術

テラヘルツ無線信号を光信号へ直接変換するデバイスの実現を目指し、電気光学（EO）ポリマー導波路と上下配置パッチアンテナアレイを用いた 375 GHz 帯アンテナ結合型光変調器の試作と評価を実施した。

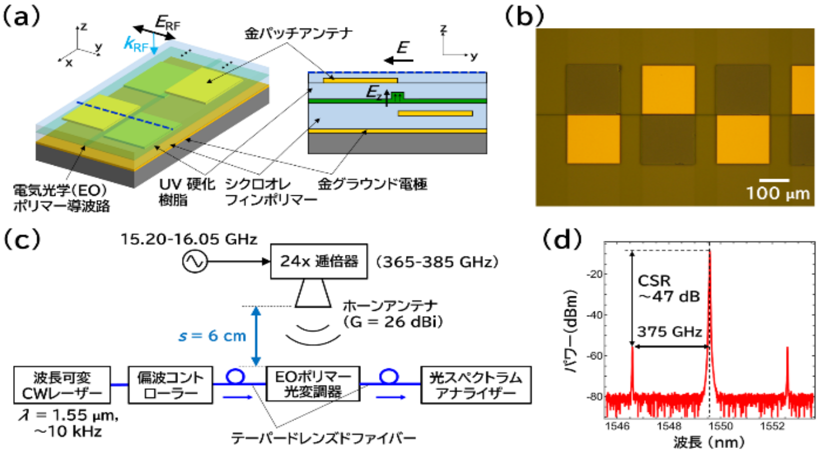


図　375 GHz 帯アンテナ結合型電気光学（EO）ポリマー光変調器の（a）顕微鏡画像、（b）評価系、（c）375 GHz 電磁波照射時の出力光のスペクトル

EO ポリマー導波路の上下に上部及び下部パッチアンテナのエッジが来るように配置されており、テラヘルツ波が照射されると EO ポリマー導波路に z 方向電場が印加され、EO 効果（ポッケルス効果）により導波路中を伝搬する光が位相変調される。

④オール光型テラヘルツ変復調技術

ベースバンド信号による変復調技術を用いて、QPSK（四相位相変調：Quadrature Phase Shift Keying）及び 16QAM（16 値直交振幅変調：16 Quadrature Amplitude Modulation）方式による THz 帯データ伝送実験を実施した。図 2-2-7(a)に示すように、実験系の中核には低位相ノイズ特性を有するマイクロ光コムを配置し、光源としての高い周波数安定性を確保している。また、光注入同期を用いた構成により、ASE 背景光の少ない光増幅を実現した。IQ 変調器は、マルチレベル変調信号の生成に利用した。さらに、受信側にはヘテロダイン検出方式を採用し、高感度かつ広帯域な信号復調を可能としている。

下図に EVM（Error Vector Magnitude）の伝送レート依存性を示す。QPSK 変調において最大 84 Gbps、16QAM 変調においては 100 Gbps のデータ伝送を達成し、いずれも HD-FEC（Hard-Decision Forward Error Correction）リミットを下回る良好な信号品質を確認した。本システムは 500〜570 GHz 帯における世界初の 100 Gbps 達成事例となった。

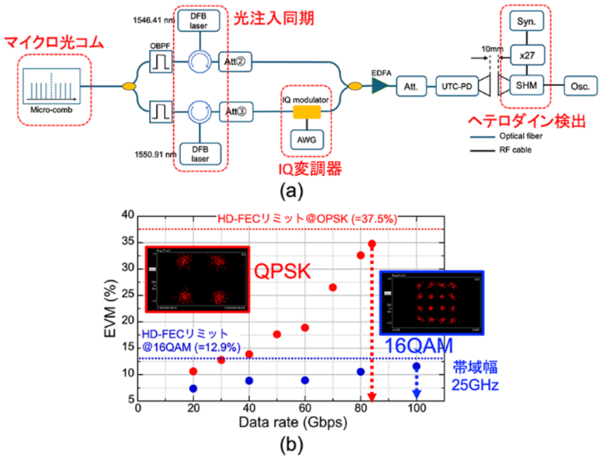


図 (a)THz 通信実験装置と(b) EVM の伝送レート依存性

テラヘルツ波・ミリ波統合ネットワーク実証技術

①要素技術の開発

テラヘルツ帯伝送システムではその特性が雨や風などの天候の影響を受けやすいという課題があるため、天候の影響を考慮に入れた伝送システム設計や、ビーム制御、複数帯域の同時使用、システム評価のための広帯域中間周波数帯技術などの開発を実施した。

図 300GHz 帯屋外伝送装置

②システム化技術

テラヘルツ波帯の RF 部の変調方式は OOK 方式としたため、それに伴い無線通信を制御する信号処理基板のインタフェース設計が必要となった。信号処理基板と、基板から出力された 25Gbps のデータ信号波形を示す。本開発では 25Gbps のデータ伝送を送受信する無線回線を最小の無線回線として、この無線回線を偏波多重や周波数多重を組み合わせることで 200Gbps のデータ伝送達成を目指した。

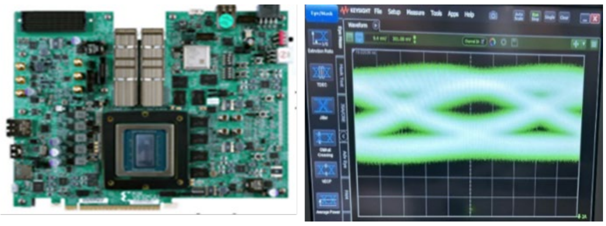


図 開発した信号処理基板と 25Gbps の出力波形

無線通信装置にて 25Gbps のデータ伝送回線を束ねるため、データの多重化及び多重化分割についての評価も実施した。なお、上記のような 25Gbps の伝送レートを持つ回線の組み合わせを、以下のように多数行うことで 200Gbps の伝送速度の達成の見通しを得た。

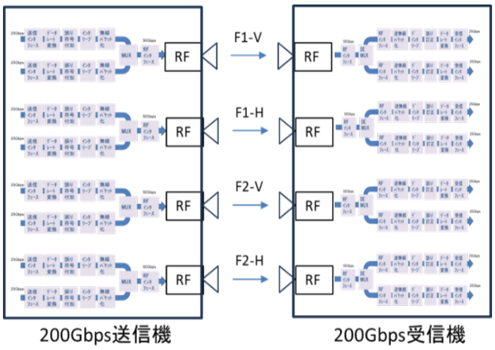


図　200Gbps 無線伝送装置の構成伝送

テラヘルツ波帯の無線回線と、周波数の異なるミリ波 60GHz の無線通信装置を並列設置し、周波数毎の伝搬特性の差を観測した結果を用いて、テラヘルツ波帯の無線回線品質の信頼性向上に利用するシステムを構築するため、60GHz 帯無線伝送装置を開発した。開発した装置の外観写真と装置諸元を下図に示す。

項目	仕様
送信周波数	57～66GHz
送信電力	10mW
データ伝送レート	400Mbps
有線インタフェース	1000base-LX
電源	DC5V 、12V
耐水性	JISC0920 5級
使用温度範囲	−10～50℃

図　60GHz 無線通信装置

3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、各要素技術における目標の達成状況、論文数や特許出願件数などの指標が用いられ、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「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６月 20 日）において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用した。また、当該会議に臨んで、本研究開発の成果として得られた電波伝搬検証基盤技術に関する外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査すると同時に、必要性・有効性等の分析を実施した。

4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績から、多数の発表を行い、査読付き誌上発表論文数が 14 件、査読付き口頭発表論文数が 67 件、特許も 9 件出願、国際標準化提案を合計 9 件提案するなど、社会実装に必要な技術を確実に確立していると認められる。

主な指標	令和３年度	令和４年度	令和５年度	令和６年度	合計
査読付き誌上発表論文数	３件 （３件）	３件 （１件）	７件 （５件）	１件 （１件）	14 件 （10 件）

査読付き口頭発表論文数 （印刷物を含む）	２件 （２件）	22 件 (22 件)	17 件 (17 件)	26 件 （ 26 件）	67 件 (67 件)
その他の誌上発表数	２件 （０件）	３件 （０件）	８件 （１件）	４件 （１件）	17 件 （２件）
口頭発表数	18 件 （４件）	35 件 (13 件)	12 件 （２件）	20 件 （３件）	85 件 (22 件)
特許出願数	０件 （０件）	３件 （０件）	３件 （０件）	６件 （０件）	12 件 （０件）
特許取得数	０件 （０件）	０件 （０件）	０件 （０件）	０件 （０件）	０件 （０件）
国際標準提案数	１件 （１件）	２件 （２件）	２件 （２件）	４件 （４件）	９件 （９件）
国際標準獲得数	０件 （０件）	０件 （０件）	０件（０ 件）	１件 （１件）	１件 （１件）
受賞数	０件 （０件）	０件 （０件）	１件 （０件）	１件 （０件）	１件 （０件）
報道発表数	０件 （０件）	０件 （０件）	２件 （０件）	０件 （０件）	２件 （０件）
報道掲載数	０件 （０件）	０件 （０件）	２件 （０件）	０件 （０件）	２件 （０件）

注１：各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。（括弧）内は、その内海外分のみを再掲。

注２：「査読付き誌上発表論文数」には、定期的に刊行される論文誌や学会誌等、査読（peer-review（論文投稿先の学会等で選出された当該分野の専門家である査読員により、当該論文の採録又は入選等の可否が新規性、信頼性、論理性等の観点より判定されたもの））のある出版物に掲載された論文等(Nature、Science、IEEE Transactions、電子情報通信学会論文誌等および査読のある小論文、研究速報、レター等を含む）を計上する。

注３：「査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）」には、学会の大会や研究会、国際会議等における口頭発表あるいはポスター発表のための査読のある資料集(電子媒体含む)に掲載された論文等(ICC、ECOC、OFC など、Conference、Workshop、Symposium 等での proceedings に掲載された論文形式のものなどとする。ただし、発表用のスライドなどは含まない。）を計上する。なお、口頭発表あるいはポスター発表のための査読のない資料集に掲載された論文等（電子情報通信学会技術研究報告など）は、「口頭発表数」に分類する。

注４：「その他の誌上発表数」には、専門誌、業界誌、機関誌等、査読のない出版物に掲載された記事等（査読の有無に関わらず企業、公的研究機関及び大学等における紀要論文や技報を含む）を計上する。

注５：PCT（特許協力条約）国際出願については出願を行った時点で、海外分１件として記入。（何カ国への出願でも１件として計上）。また、国内段階に移行した時点で、移行した国数分を計上。

注６：同一の論文等は複数項目に計上しない。例えば、同一の論文等を「査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）」および「口頭発表数」のそれぞれに計上しない。ただし、学会の大会や研究会、国際会議等で口頭発表を行ったのち、当該学会より推奨を受ける等により、改めて査読が行われて論文等に掲載された場合は除く。

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	周波数のひっ迫が進む中で、無線システムの高周波数帯への移行が求められており、「Beyond 5G 推進戦略－6G へのロードマップ－（令和２年６月 30 日）」でもテラヘルツ波に関連する技術の高度化・標準化の重要性が指摘されている。 また、5G の進展に伴い、莫大な数の小型の基地局及びリモートアンテナ局の設置が必要となり、その接続リンク（フロントホール）の必要容量も激増することが想定される。スモールセルの多用が見込まれる中、全てを光ファイバで接続することが地理的・コスト的に困難であるため、設置が容易で 200Gbps を超える伝送レートが確保可能な無線通信技術の研究開発が急務であった。 そのため、本研究開発によって取り組む超高周波数帯における無線技術及び光ファイバ信号との相互変換技術は、固定無線の高周波数帯への移行を進める電波資源の有効利用に資するものであり、国が実施すべき研究開発として推進する必要があった。

	よって、本研究開発には必要性があったと認められる。
効率性	本研究開発を実施するに当たって、テラヘルツ波や光通信に関する豊富な研究実績や専門知識を有する受託者によって、蓄積されたノウハウや知見を有効に活用することで、質の高い研究開発が進められた。 実施期間中も受託各社の研究代表者・実務者の定期的会合において各社の進捗状況や課題が調整・共有され、さらに外部の有識者と受託者から構成される運営委員会にて研究進捗や進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のため情報交換が積極的に行われた。 経費の執行にあたっては、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、効率的に実施した。 よって、本研究開発には効率性があったと認められる。
有効性	４年間の研究開発を通じて、350-600GHz 帯を利用した無線伝送基盤技術を確立し、100m 以上の距離で 200Gbps 超の伝送容量、100μs 程度の遅延といった、超大容量低遅延無線伝送技術を実現するための基盤技術を確立した。 また、本研究開発は、無線機器メーカーや大学等研究機関を構成員に含むコンソーシアムや外部有識者や専門家を含む研究開発運営委員会などとの連携・協力を得つつ、研究開発と実証実験を一体的に推進しており、研究成果の実用化等へ向けた高い確実性が得られた。 さらに、本研究開発で得られたテラヘルツ波に関する成果は、ITU-R や APT 等の国際標準化機関へ積極的に入力された。本研究開発で実施した周波数帯域は ITU-R においても割り当て、特定が行われていないため、固定無線への特定・割り当てに関する議論は今後行われる予定だが、本研究開発の成果を基にした寄与文書により国際標準化での議論が開始されたことの意義は大きく、日本の国際競争力を向上させ、経済的・社会的効果が得られるものと期待される。 よって、本研究開発には有効性があったと認められる。
公平性	本研究開発によって実用化を目指すテラヘルツ帯の実用無線機は、モバイルフロントホール・バックホールでの利用や、山間部といった光ファイバが敷設困難な地域おいて利用されることが見込まれ、高周波数帯を利用した超高速・大容量無線通信を実現することは、広く国民の利益になるものである。 また、本委託研究開発で得られた成果について、ITU-R や APT をはじめとした国際標準化機関に提案を行うことで、国際標準化を目指した。これは広く我が国における無線通信メーカーの利益となることが期待される。 また、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・選定した。 よって公平性があったと認められる。
優先性	5G の商用サービスがスタートし、ユーザスループットとして 1Gbps を超える高速モバイル通信が普及しつつある。しかし、瞬間ピークレート 20Gbps を目指す 5G において、リモートアンテナ局と基地局内ベースバンドユニットを結ぶデジタル伝送システムを用いたモバイルフロントホールの容量不足が課題となっている。さらに、5G の進展に当たっては、更なるユーザスループットの向上に加え、IoT 等の超多数接続が要求されるため基地局とリモートアンテナ局を結ぶモバイルフロントホールの必要容量が激増することが予想されている。そのため、高周波数帯を用いた高速大容量の固定通信を実現することは喫緊の課題である。 Beyond 5G 推進戦略－6G へのロードマップ－（令和２年６月 30 日）においても、「超高速・大容量といった 5G が有する特長の更なる高度化に加えて、自律性や拡張性といった新たな機能を実現するには、テラヘルツ波や光・量子、AI 等の非連続な飛躍的進化を可能とする先端技術を含む無線技術、ネットワーク技術、省エネ技術、セキュリティ技術、そして、これらの基盤となるソフトウェア関連技術等の開発・高度化・標準化が不可欠である。」こととされている。WRC-31 に向けた議題 1.8 についても、275GHz 以上

	の規格の策定を目標としており、それに向けた我が国における高度な通信技術の国際標準化を推進することは緊急を要する。

5　政策評価の結果（総合評価）

5G の進展に伴い、莫大な数の小型の基地局及びリモートアンテナ局の設置が必要となり、スモールセルの多用が見込まれる中、全てを光ファイバで接続することが地理的・コスト的に困難であるため、設置が容易で 200Gbps を超える伝送レートが確保可能な無線通信技術の研究開発が急務であった。

本研究開発は、無線フロントホール・バックホールに使用する周波数帯をマイクロ波・ミリ波よりも高い周波数帯に移行するために、大気減衰の大きさからこれまで利用が進んでいなかった 350GHz 以上の周波数を利用した 200Gbps 超の低遅延・大容量無線伝送を実現することを目指した。

４年間の研究開発を通じて、350-600GHz 帯を利用した無線伝送基盤技術を確立し、100m 以上の距離で 200Gbps 超の伝送容量、100μs 程度の遅延といった、超大容量低遅延無線伝送技術を実現するための基盤技術を確立した。

本研究開発の成果は、査読付き誌上発表論文数が 14 件、査読付き口頭発表論文数が 67 件などと多数であり、特許も９件出願するなど、社会実装に必要な技術も確実に確立していると認められる。加えて国際標準化に向けた取り組みも積極的に推進しており、国際標準化提案を合計９件提案している。

よって、本研究開発には有効性、効率性等があると認められた。

＜今後の課題及び取組の方向性＞

国際標準化団体への寄与文書入力を行うことによって継続的に標準化活動を行う予定であり、ITU-R WP5C にて、450GHz 以上の固定無線アプリケーションの技術特性や運用特性に関するレポート作成の議論が行われているところ、本研究開発にて得られた知見を提供していく。

加えて、社会実装に向けた取り組みも実施する予定であり、ホーム監視用 8K 映像伝送や、ロボティクス用の瞬時大容量伝送などテラヘルツ帯でしか実現できない応用分野開拓を進めていく予定である。

6　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６月 20 日）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、外部有識者から以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

・電気光発振器の利用による低位相雑音テラヘルツ発振に関しては特徴的な成果を創出しており学術的価値が認められる。特に、オール光回路で 375GHz 発振回路・検出回路等を実現した部分は大いに評価できる。
・本研究プロジェクトは、テラヘルツ帯 RF 技術の研究開発において、当初目標をおおよそ達成している。500GHz 帯集積回路の開発では、搬送波周波数 500GHz、帯域幅 50GHz の送受信 MMIC を実現し、出力電力 0dBm 以上を達成した。
・APT/AWG の AWG-34 で新レポートが承認、また、ITU-R WP5C で継続審議、2026 年度の新レポート承認に向け推進している。よって、総合的に見て有益であったと思われる。

7　評価に使用した資料等

○デジタル時代の新たな IT 政策大綱（令和元年６月７日）
https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12187388/www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20190607/siryou1.pdf

○「Beyond 5G 推進戦略　－6G へのロードマップ－」の公表（令和２年６月 30 日報道発表）
https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000364.html

○電波利用料による研究開発等の評価に関する会合
https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/