

## 1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

- ◆研究開発課題名：超低雑音信号発生技術に基づく300GHz帯多値無線通信に関する研究開発
- ◆受託者：(大)大阪大学、IMRA AMERICA, INC.、(大)九州大学、(大)東京大学、(学)北里研究所(令和4年度まで)
- ◆研究開発期間：令和3年度～令和5年度(3年間)
- ◆研究開発予算(契約額)：令和3年度から令和5年度までの総額787百万円(令和5年度264百万円)

## 2. 研究開発の目標

光技術に基づく300GHz帯の超低雑音信号発生技術を基に、光電変換技術ならびに受信技術の高度化を進め、同周波数帯における超多値無線システムを実現する。

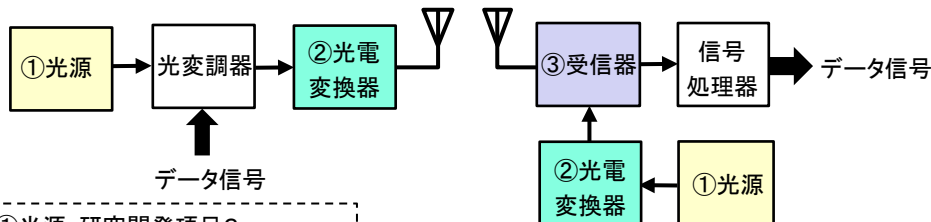
## 3. 研究開発の成果

### 研究開発目標

### 研究開発成果

#### 研究開発項目1 多値通信システム技術の開発

システム構成と技術開発のターゲット(全光駆動型システム)



- ①光源: 研究開発項目2
- ②光電変換器: 研究開発項目3
- ③受信器: 研究開発項目4

\*HD-FECリミット(ビット誤り率=3.8 x 10<sup>-3</sup>以下)を満たすこと

	RF帯域	IF/BB帯域	変調方式	伝送速度*	伝送距離	送信電力	検出方式
2021	>30GHz	>30GHz→>20Gbaud	16QAM 32QAM	>80Gbit/s	<1 m	0.05~0.1 mW (従来PD)	ホモダイン(SBD)
2022	>30GHz	>30GHz→>20Gbaud	16QAM ~ 128QAM	>140Gbit/s	>1 m	0.4~0.8 mW (線形領域)	ヘテロダイン&ホモダイン(FMBD)
<b>2023</b>	>40GHz	>40GHz→>25Gbaud	16QAM ~ <b>256QAM</b>	>200Gbit/s	>200 m	5~10 mW	ヘテロダインまたはホモダイン(FMBD)

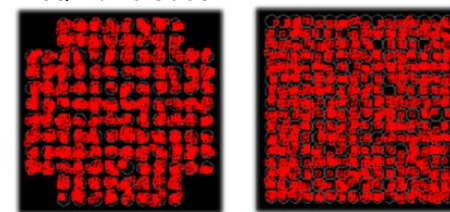
#### 研究開発項目1-a)/1-b)超低雑音送信システム/高感度受信システム

各検波方式に対して、送受信システムの最適化を行い、表のように、目標の200Gbit/sを超える伝送速度を実証し、伝送距離214mで、220Gbit/s(世界最高性能)を達成した。

検波方式	主要デバイス (青字は本研究開発で新たに開発したもの)	達成性能
ヘテロダイン	SBDサブハーモニックミキサ ブリルアン光源(RF&LO) 従来型UTC-PD 60 dBi カセグレンアンテナ	275 GHz 32QAM <b>220 Gbit/s (HD-FEC) @214 m</b> (SiC UTC-PDの使用により200mに見直し) 64QAM <b>252 Gbit/s (HD-FEC) @ 3 cm</b>
ホモダイン (イントラダイン)	FMBD/バランス型ミキサ EOコム光源(RF)/ブリルアン光源(LO) 従来型UTC-PD ホーンアンテナ(24 dBi)	302GHz 32QAM <b>200 Gbit/s (HD-FEC)</b> 5 cm
セルフヘテロダイン	FMBD基本波ミキサ EOコム光源+フリーランレーザ SiC UTC-PD ミニカセグレンアンテナ(37 dBi)	300GHz 32QAM <b>100 Gbit/s (HD-FEC)</b> 50 cm

**128/256QAMの超多値変調**において、世界で初めてHD-FECリミットで、120Gbit/sを超える伝送速度を実証

128QAM/175 Gbit/s      256QAM/120 Gbit/s



## 研究開発項目2 光源技術の研究開発

## 2-a)-① 送受信デバイス評価向け超低雑音光源の開発

下記の性能を持つ光源を開発し、高速テラヘルツ通信に必要な光源のノイズ仕様を探索する。

- ・キャリア周波数: 150/300GHz
- ・位相雑音:  $-110\text{dBc}/\text{Hz}@10\text{kHz}$
- ・周波数可変幅: 100Hz~100GHz

## 2-a)-② 通信用ラボセットアップ用マイクロ光コム発振器プロトタイプの実験

・受信機用(LO)に上記仕様を有する光源を開発し、通信実験に提供する。

## 2-a)-③ 周波数可変超低雑音マイクロ光コム発振器の原理実証

- ・1つの基板上に複数のマイクロ光コムの共振器を作りこみ、周波数が切り替え可能なマイクロ光コム発振器を実現する。
- ・共振器の国産化に挑戦し、要素技術の構築および試作・評価を行う。

2-a)-①マイクロ光コムと同時に開発を進めていたブリルアン発振器を受信機用の光源に選択。300GHz帯において位相雑音 $-120\text{dBc}/\text{Hz}@10\text{kHz}$ 、強度雑音 $-147\text{dBc}/\text{Hz}@1\text{GHz}$ を実現し、従来型の電気シンセサイザ方式と比し、200Gbit/sのテラヘルツ通信において約1桁ビットエラーレートが小さくなることを実証した。

2-a)-② キャリア周波数120-320GHz範囲で可変、19インチラックに収納した可搬型のラボセットアップ(右図)を完成させ、大阪大学での通信実験で常時運用した。

## 2-a)-③

300GHz/274GHzの周波数切り替え型マイクロ光コムを実証した。また、国内の研究施設にて、マイクロ光コム発振器素子を開発し、コム発振を確認した。



## 研究開発項目3 送信フロントエンド技術の開発

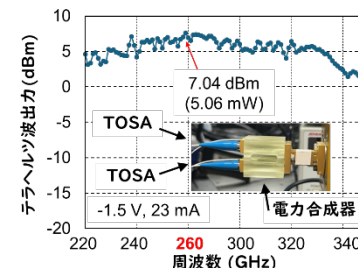
## 3-a) 高出力フォトダイオード

- ・SiC上UTC-PD単体により300GHz帯テラヘルツ波出力1mWを実現する。従来型モジュール比1/4の体積の同軸型(TOSA)導波管モジュールを実現する。
- ・16ch位相調整光集積回路を開発し、テラヘルツ波の合成による出力の増大とビームステアリングの基本動作を検証する。

## 3-b) 広帯域3次元アレー型アンテナ

- ・300GHz帯での出力 $>5\text{mW}$ を実現するために、電力合成を可能とする導波管デバイスを実現する。
- ・16台の300GHz帯小型TOSAによるビームステアリングを実現するために、 $4 \times 4$ 導波管アレーアンテナを作製する。

3-a) SiC上に作製したUTC-PDで $9\text{mm} \times 9\text{mm}$ の300GHz帯テラヘルツTOSAを実現し、単体で4mW出力を実現した。また、16ch位相調整器を開発し、導波管型電力合成器で2つのTOSA出力を合成し5mWを実現した(右図)。さらに、4出力を合成し、ビームステアリングに成功した。



3-b) 300GHz帯の自由形状導波管作製技術を確認し、ストレート導波管、BPF導波管、ねじれ導波管、Y分岐導波管(導波管型電力合成器として3-a)に提供)を作製し、ほぼ、設計通りの特性が得られることを確認した。また、 $4 \times 4$ 導波管アレーアンテナ構造の造形に成功し、また、16本の独立の導波管をほぼ均一にめっき膜を同時に形成する技術の目途が得られた。

## 研究開発項目4 受信フロントエンド技術の開発

## 4-a) 高感度テラヘルツ波検出器

- 検出素子として「フェルミレベル制御バリア・ダイオード(FMBD)」を用い、
- ・異種基板上へのエピ層転写技術を確認する
  - ・300GHz帯で動作する導波管入力型のテラヘルツ波検出器を開発し、ダイナミックレンジを従来よりも10dB以上拡大すると共に、IF帯域40GHzを実現する。
  - ・進捗状況に応じ、FMBDを用いたI/Qミキサの集積化を検討する。

## 4-a)

## ・検出器の特性改善

検出器モジュールの特性改良のため、新たにSi基板貼付け技術を採用し、設計・試作・評価を実施した結果、300GHz帯での基本波ミキシングにおけるIF信号の帯域42GHzを達成した。また、IF出力飽和時のLO強度とNEPを改善し、ダイナミックレンジを従来比で20dBまで拡大した。

## ・I/Qミキサの検討

I/Qミキサの基本要素であるバランス型ミキサの改良を行い、IF回路までの全集積化を実現することで、集積化I/Qミキサ実現への見通しを得た。

4. 特許出願、論文発表等、及びトピックス

国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	標準化提案	プレスリリース 報道	展示会	受賞・表彰
4 (1)	0 (0)	8 (4)	132 (71)	0 (0)	2 (2)	1 (1)	14 (8)

※成果数は累計件数、( )内は当該年度の件数です。

<運営委員会の開催:第2回>

本研究開発の目標や進め方等について、外部有識者からの意見や指導を仰ぐことを目的として、第2回運営委員会を、東京大学において(2023年12月15日15時~17時40分、参加者:外部有識者8名、研究実施者:10名)開催した。

<Beyond 5G の車社会へのユースケース調査の実施:第2回>

モビリティ分野におけるBeyond 5G のユースケースを調査し、研究開発成果の同分野への適用性や有用性を明らかにすることを目的として、V2X/ITS分野の外部有識者を交えたワークショップ形式による調査検討会を開催した。2024年1月~2月。

<展示会・ニュースリリース>

5G/Beyond 5G関連分野の国内最大の展示会である、マイクロウェーブ展(パシフィコ横浜:2023年11月29日~12月1日)において、ポスター、ビデオとともに、開発した部品(3Dプリント技術による導波管部品、TOSAフォトダイオード、FMBDモジュール、小型カセグレンアンテナ)の陳列を行った(右図)。また、2024年1月31日に、国内に向けて、「シングルチャネルで世界最高の無線通信速度を達成!」、海外に向けて「Photonics-based wireless link breaks speed records for data transmission」という見出しで、個別にプレスリリースを行った。



開発した各種部品の展示

ポスター展示



<招待講演・依頼講演:計13件>

国内外の会議で数多くの招待講演、依頼講演を行った。

<学生・若手研究者の受賞:計8件>

学生や若手研究者の積極的な研究発表により、国内外から多くの賞を受けた。

5. 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

本プロジェクトの大きな成果である「日本製」の部品技術(高出力フォトダイオード、高感度検出器、3D導波管部品)を、我が国のBeyond5Gの研究開発の底上げのために活用する。そのために、協力企業等による早期製品化を支援する。また、低位相雑音信号源について計測器メーカーが強い関心を示しており、計測機器への実導入に向けた議論を開始する。通信システムに関しては、Jバンド(220GHz~325GHz)帯のユースケースの議論をさらに推し進めて、リアル顧客ニーズを見出し、それにターゲットを絞ったシステム開発とデモンストレーションを行いたい。残された課題としては、2次元フェーズドアレイへの展開とそれを支える光電融合集積プラットフォームの研究開発が重要と思われる。最後に、本研究開発で得た知識や技術を、大学等の研究機関のレベルアップのため、あるいは研究開発者の育成のために継承したいと考えている。