

令和 4 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 00901

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

(1) 研究開発の目的

本研究開発では、フォトリソ技術を用いた 300GHz 帯の超低雑音信号発生技術を基に、光電変換器(単一走行キャリアフォトダイオード:UTC-PD)ならびに受信器(フェルミレベル制御バリアダイオード:FMBD)の高性能化を進め、マイクロ波帯と同程度の多値化を可能とする無線システムの実現を目指す。具体的には、RF 帯域幅 40GHz を利用し、256QAM 多値変調によって >200Gbit/s/ch を実現し、伝送実験において通信距離>200m を目標とする。

(2) 研究開発期間

令和 3 年度から令和 5 年度 (3 年間)

(3) 受託者

国立大学法人大阪大学 <代表研究者>  
IMRA AMERICA, INC.  
国立大学法人九州大学  
国立大学法人東京大学  
学校法人北里研究所

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 3 年度から令和 4 年度までの総額 523 百万円  
(令和 4 年度 417 百万円) ※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1 多値通信システム技術の開発

研究開発項目 1-a) 超低雑音送信システム (大阪大学)

研究開発項目 1-b) 高感度受信システム (大阪大学)

研究開発項目 2 光源技術の研究開発

研究開発項目 2-a) 超低雑音マイクロ光コム発振器 (イムラ アメリカ)

研究開発項目 3 送信フロントエンド技術の開発

研究開発項目 3-a) 高出力フォトダイオード (九州大学)

研究開発項目 3-b) 広帯域 3 次元アレー型アンテナ (東京大学)

研究開発項目 4 受信フロントエンド技術の開発

研究開発項目 4-a) 高感度テラヘルツ波検出器 (北里大学)

(6) 特許出願、外部発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	2	2
	外国出願	0	0

外部発表等	研究論文	4	4
	その他研究発表	61	48
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	0	0
	受賞・表彰	6	6

(7) 具体的な実施内容と成果

**研究開発項目 1：多値通信システム技術の開発（大阪大学）**

研究開発項目 1-a) 超低雑音送信システム

研究開発項目 2 で開発された光源のプロトタイプと UTC-PD を組み合わせ、多値変調時において、上記の性能を実現するに十分な強度雑音性能の送信システムを開発し、また今後の性能向上に向けた課題を明らかにした。

研究開発項目 1-b) 高感度受信システム

ホモダイン受信方式、ヘテロダイン受信方式の双方の受信器を開発し、また、両方式で光 LO 信号駆動型の受信器の検討を行った。イムラ アメリカが開発中のレーザ光源（ブリルアン光源）を用いた送信器とヘテロダイン受信器（電気 LO 駆動型）を用いることにより、16QAM で 140Gbit/s（今年度目標値）を達成した。また、送受信器の双方にブリルアン光源を用いた、世界初のオール光駆動型の無線通信システムを構築し、80Gbit/s までの性能を実証した。さらに、研究開発項目 4 で開発された FMBD 検出器により、OOK で 32Gbit/s（従来 20Gbit/s）のエラーフリー伝送に成功するなど、大幅な性能向上を実証した。

**研究開発項目 2：光源技術（イムラ アメリカ）**

・研究開発項目 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作製

2022 年度までに開発してきたマイクロ光コム発振器のプロトタイプ機を完成させ、19 インチラックに搭載できるサイズまでダウンサイジングを行った。一方で、大阪大学との高速通信実験の中間結果から、本プロジェクトの目標達成には光源は、より高い信号対雑音比（60dB 以上）と低い相対強度雑音が必要となることが新たに判明した。そこで、イムラアメリカが独自に開発を行っていたブリルアン発振器（レーザ）を本プロジェクトに投入し、低雑音発振器として機能させることを考案した。ブリルアン発振器はマイクロ光コム発振器を用いる際にも参照用光源として用いており、雑音性能はマイクロ光コム発振器と同等かそれ以上であることが期待されていた。実際にブリルアン発振器を用いた通信実験では、100Gbit/s を超える通信速度が実現できたため、19 インチラックに搭載できる可搬型プロトタイプ機の作製を行い、下記の性能を得た。また、上記で開発したブリルアン発振器は、大阪大学で実施されている通信実験に投入し、実機評価を開始している。

項目	目標値	結果			
		マイクロ光コム発振器		ブリルアン発振器	
キャリア周波数	300GHz 周辺	311GHz	○	300GHz	○
周波数可変幅	100Hz~100GHz	数MHz	○	±30GHz	○
位相雑音	-110dBc/Hz 以下 @10kHz	-90dBc/Hz	×	-120dBc/Hz	○
信号対雑音比	60dB 以上	60dB	○	67dB	○

出力パワー	100mW以上	100mW	○	200mW	○
サイズ	可搬型であること	19インチラック 2台で構成	○	19インチラック 1台で構成	○

・研究開発項目 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

274GHz 帯および300GHz 帯で動作が可能なマイクロ光コム発振器を実現するためのマイクロ光コムの設計・製作を行い、それぞれの周波数帯にてマイクロ光コム発振器が機能することを確認した。現在、発振器の集積化に向けた素子製作の基本工程の構築を行っている。

**研究開発項目 3：送信フロントエンド技術の開発（九州大学・東京大学）**

4×4 アレーテラヘルツ波送信フロントエンドの構成要素である、SiC 基板上 UTC-PD の作製およびテラヘルツ TOSA 部材の作製を行った。また 3 次元 4×4 導波管アレーの構造設計と、その構成要素である単体導波管の作製と特性評価を行った。

研究開発項目 3-a) 高出力フォトダイオード

ウエハ接合技術により、UTC-PD を SiC 上に作製することに成功した。従来型モジュール比 1/4 の体積の 300GHz 帯 UTC-PD TOSA 用同軸型導波管モジュール部材の作製を完了した。

研究開発項目 3-b) 広帯域 3 次元アレー型アンテナ

3 次元アレー型アンテナは、16本の独立な 300GHz 帯曲線導波管（断面 0.86×0.43×約 50mm<sup>3</sup>）が 4×4 の 3 次元配置されたものである。この 3 次元チャンネル構造は、UV 硬化樹脂型 3D プリンタ（RECILS）で造形し、その後、チャンネルの内部表面にめっきで金属表面修飾することで導波路が実現される。このめっきでは、絶縁体表面を対象としているため、無電解めっきが必要となり、さらに、断面がサブミリメートルで、長さが数 10mm になるために、新たな技術・ノウハウ等が必要である。これまでにそのめっき条件の把握を進め、ニッケルをバッファ層とし、その上に銅を数 μm 形成する技術を確立した。また、この応用の一つとして、200～400GHz 帯でのバンドパスフィルタを作製し、金属製バンドパスフィルタと同程度の特性が確認された。これらの結果から、3D プリンタとめっきを融合することでサブ THz 帯導波管デバイスが、短時間でかつ安価に実現できることを確認した。

**研究開発項目 4：受信フロントエンド技術（北里大学）**

研究開発項目 4-a) 高感度テラヘルツ波検出器

導波管入力型検出器モジュールの特性改良に向け、新たに設計・試作・評価を実施した結果、基本波ミキシングにおける中間周波数（IF）の 3dB 帯域として、従来の結果（26GHz）を大幅に上回る 39GHz を達成した。また、システム検討用のモジュール提供も行った。さらに、I/Q 受信器の実現に向け、基本構成要素であるバランス型ミキサの設計・試作も行い、基本動作を確認した。

(8) 今後の研究開発計画

300GHz 帯を使用し、RF 帯域: 30GHz～40GHz、ベースバンド帯域: 15GHz～20GHz、IF 帯域（ヘテロダイン方式の場合）: 30GHz～40GHz において、変調方式 32QAM～256QAM で、シングルチャンネルあたりの伝送速度を段階的に増加させ、最終的に 200Gbit/s を達成する。さらに、送信電力の増加、受信器（FMDB）の高感度化、アンテナの高利得化を図り、通信距離として 200m を達成する。

これらを実現するための要素技術の開発として、送受信システムにおける非線形性の補償、光源の小型化と長期安定化、フォトダイオードの高出力化、同アレーによる電力合成、高利得アンテナのビーム位置決め技術の開発、受信器の小型化（I/Q 受信器化）の検討等を進める。