

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、32~256QAM 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 北里大学 (令和 4 年度まで)

(4) 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)

※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 (IMRA AMERICA)

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 (令和 4 年度まで)、東京大学)

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

(7) 具体的な実施内容と最終成果

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

300GHz 帯において、256QAM 変調を可能とし、RF 帯域として最大 40~60GHz を用いて、 $>200\text{Gbit/s}$ の送信システムを実現した。

研究開発項目 1-b) 高感度受信システム

300GHz 帯において、256QAM 復調を可能とし、RF 帯域最大 40~60GHz、IF/BB 帯域最大 40~60GHz で、 $>200\text{Gbit/s}$ のオンライン復調システムを実現した。3つの受信方式（ホモダイン、ヘテロダイン、セルフヘテロダイン）について検討を行った。ホモダイン受信方式で 200Gbit/s (32QAM/HD-FEC リミット)、ヘテロダイン受信方式で 252Gbit/s (64QAM/HD-FEC リミット)、セルフヘテロダイン受信方式で 100Gbit/s (32QAM/HD-FEC リミット) を達成した。60dBi のカセグレンアンテナを送受信に用い、ヘテロダイン受信方式で、通信距離 214m で 220Gbit/s (32QAM/HD-FEC リミット) を実証した。

研究開発項目 2：光源技術の研究開発（IMRA AMERICA）

研究開発項目 2-a)-① 送受信デバイス評価向け超低雑音光源の開発

テラヘルツ通信における光源のノイズ依存性を測定した。受信機 (LO) 用の光源として、開発したブリルアン発振器（位相ノイズ、10kHz において -120dBc/Hz 、強度ノイズ、1GHz において -147dBc/Hz 、信号雑音強度比 67 dB）と従来型の電気シンセサイザを用いた場合とを比べたところ、ブリルアン発振器の方が通信速度 200Gbit/s においてビットエラーレートは約 1 桁小さくなることが分かり、低ノイズ性の効果を実証した。

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 of 作製
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の超低ノイズ性と発振周波数可変性に着目し、受信機用の光源として選択。キャリア周波数 120-320GHz にわたり周波数可変、位相ノイズ、10kHz において -120dBc/Hz の性能を有し、19 インチラックに収納できる可搬型ブリルアン発振器（2 台目）を開発し、大阪大学での通信実験に提供した。

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

キャリア周波数 300 GHz および 274 GHz で、周波数ステップ 1 GHz、周波数範囲 $\pm 10\text{GHz}$ の 38 種類の共振器を 1 チップ上に配置したマイクロ光コム共振器を試作した。また、

ファイバ型光スイッチを用いて光結合する共振器を切り替えることで 300 GHz および 274 GHz で発振する周波数切り替え型のマイクロ光コムを実証した。

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 を用いたテラヘルツ TOSA を作製し、4mW 出力を達成した。また2つの TOSA 出力を合成して 5mW を実現した。

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。このデバイスを用いた従来型モジュール比 1/4 の体積となる 9mm x9mm の 300GHz 帯テラヘルツ TOSA を実現し、フォトミキサとしては従来の最大値の 2 倍となる 4mW 出力を実現した。また、東大で設計・作製した 2×1 導波管型電力合成器で 2 つの TOSA 出力を光遅延器で位相を合わせて合成し 5mW を実現した。さらに 16ch 位相調整器を開発し、4 出力を合成してビームステアリングに成功した。

研究開発項目 3-b) 広帯域 3 次元アレー型アンテナ

UTC-PD TOSA 単体での大出力化が大きく前進したため、2 個の UTC-PD TOSA の電力合成で、目標（出力 5mW）が達成される目途が得られたため、計画を変更し、Y 分岐導波管による電力合成の実現を進めた。その結果、研究開発項目 3-a) で述べたように 5mW の出力を実現した。

研究開発項目 4：受信フロントエンド技術の開発（北里大学（令和 4 年度まで）、東京大学）

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のため、新たに Si 基板貼付け技術を採用し、基板接合プロセス、素子作製プロセス、及び実装部品の改良を実施した。回路要素の設計は、引き続き大阪大学の協力を得て進めた。その結果、300GHz 帯での基本波ミキシングにおける IF 信号の 3dB 帯域として、目標を上回る 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。さらに、I/Q ミキサの基本要素であるバランス型ミキサの改良試作も行い、IF 回路を含めた集積化と特性改善を実現することで、集積化 I/Q ミキサ実現への見通しを得た。

(8) 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 Beyond 5G 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ー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。