

令和4年度研究開発成果概要書

採択番号 00301
研究開発課題名 テラヘルツ帯を用いた Beyond 5G 超高速大容量通信を実現する無線通信技術の研究開発
研究開発項目 1 テラヘルツ帯増幅器一体型アレイアンテナ技術の研究開発
副題 テラヘルツ帯を用いたビーム制御通信システムの研究開発

(1) 研究開発の目的

室内空間において、ユーザーが必要とする大容量データを無線伝送する需要に向けて、従来のマイクロ波やミリ波では不可能な広い帯域を確保できる“テラヘルツ波”を用いたビーム制御通信システムの研究開発を実施する。テラヘルツ帯無線通信における電波の指向性を高めるため、化合物半導体を用いた高出力増幅器とアンテナを3次元異種集積によりアレイ化することで、300GHz帯で動作する増幅器一体型アレイアンテナを開発し、ビーム制御を実現する。

(2) 研究開発期間

令和3年度から令和6年度（4年間）

(3) 受託者

富士通株式会社<代表研究者>
学校法人五島育英会 東京都市大学

(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 600 百万円（令和4年度 378 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 テラヘルツ帯増幅器一体型アレイアンテナ技術の研究開発
1-a) ビーム制御機能を有する増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュールの研究開発（富士通）
1-b) 300GHz帯アレイアンテナの研究開発（東京都市大学）
1-c) 増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュールを用いた伝送実験（富士通）

(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	3	2
	外国出願	1	1
外部発表等	研究論文	0	0
	その他研究発表	14	11
	標準化提案・採択	1	1
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	2	2
	受賞・表彰	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

研究開発項目 1：テラヘルツ帯増幅器一体型アレイアンテナ技術の研究開発
令和3年度に実施した各項目の要素技術検討や課題抽出の結果を元に、1×4導波管アンテナモジュールの詳細設計・試作を行い、ビーム振り角 0、10° において 10dBi の利得を実現

し、本年度目標を達成した。各項目別の実施内容と成果は以下の通りである。

1-a) ビーム制御機能を有する増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュールの研究開発

最終目標である増幅器一体型4×4アレイアンテナ送信モジュールの実現に向けて、1-b)の検討を基に1×4導波管アンテナモジュールを設計し、試作・評価するとともに、4×4 SIWアンテナおよび八木・宇田型アンテナモジュールの基礎検討および設計を行った。以下に概要をまとめる。

(1) 1×4導波管アンテナモジュール

アンテナ導波管/50 μ m幅MSL配線($Z_0=50\Omega$)の変換部で入力反射(S11)が大きいという問題に対して、アンテナ導波管へ突き出すMSL配線幅を20 μ mとすることで高インピーダンスにし、テーパ配線を用いて $Z_0=50\Omega$ 設計のパワーアンプに連結される50 μ m幅MSL配線に接続することにより入力反射(S11)を抑制できることの知見をシミュレーションにより得た。

また、アンテナ利得・ビーム制御実験を可能にするため、WR3標準導波管(0.864×0.432mm)からアンテナ導波管(0.6×0.432mm)を連結する4ポート導入導波管を装備したモジュールを設計した。シミュレーションにより導入導波管で生じるポート間位相差を補正し、結果としてアンテナ利得10.6dBi、各ポート間位相差45°でビーム振り角10°と本年度目標(9dBi, $\pm 10^\circ$)を達成できる見込みを得た。

上記知見を基に、アンテナピッチ:0.7mmの1×4導波管アンテナモジュールを試作し、1-c)で構築したモジュール初期評価系にてアンテナ利得・ビーム制御実験を行った結果、ビーム振り角0、10°において10dBiの利得を実現し、本年度目標を達成した。

(2) 4×4アンテナモジュール

立体積層4×4アレイアンテナモジュールの実現に向けて、従来のSiよりも熱伝導率の優れたSiCをベースとするインターポーザ構造を用いたSIWホーンアンテナについてシミュレーションにより初期検討した結果、放射部の金属ストリップの幅と間隔を(SiC内の)1/4波長内で徐々に変化させることによりSIWホーンアンテナから空間に電磁波放射可能で、かつ、300GHzにて1×4横並列アンテナアレイでアンテナ利得約11dBi、ビーム振り角10°(位相シフト=45°)、また、1×4縦並列アンテナアレイでアンテナ利得約9.5dBi、ビーム振り角16°(位相シフト=45°)の知見を得た。

また、SiC SIW構造の最適化を行うとともにSIWアンテナをモジュールの金属筐体に実装することを考慮し、金属壁付きホーン部無しSiC SIW単体アンテナのアンテナ利得の金属壁位置依存性についてシミュレーションした結果、反射器として機能する金属壁をSIW部と放射部の界面からメインローブ方向に誘電体基板の $\lambda/2$ 分進んだ位置からバックローブ方向に空気の $\lambda/2$ 後退した位置に配置することにより反射波が進行波と同位相となり、アンテナ利得を向上させることの知見を得た。さらに、研究開発項目1-b)で設計したYagiUdaアンテナを用いたモジュールについても電磁界解析を行い、上述のSiC SIWアンテナの場合と同様のメカニズムでアンテナ利得の金属壁位置依存性があることの知見を得た。

上記検討を踏まえ、300GHzにおける4×4 SiC SIWアンテナアレイのアンテナ利得およびビーム制御についてシミュレーションした結果、位相シフト(横, 縦)=0°でアンテナ利得17.8dBi、位相シフト(横, 縦)=-120°で上下方向ならびに水平方向のビーム振り角はそれぞれ36°, 30°と最終年度目標(アンテナ利得15dBi、ビーム振り角30°)を達成できることの知見を得た。本知見を基に、4×4増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュールの基本設計を行った。

1-b) 300GHz帯アレイアンテナの研究開発

2023年3月(中間目標)において、1×4増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュール(ビームスキャン角度 $\pm 10^\circ$ において利得9dBi)を実現するために、2022年度は以下の(1)~(5)の項目を検討した。

(1) 導波管開口アンテナ(単素子)の設計と利得測定

グレーティングローブを抑圧するために、アンテナピッチを1波長(1mm)未満とする必要がある。前年度の検討により、0.7mmの素子間隔とすることを目標とし、0.6mm×0.432mm

の開口を有する中空導波管開口アンテナを設計した。送受に同一のアンテナを用いる 2 アンテナ法で利得測定を行った。導波管開口アンテナ単体の利得はシミュレーションで 7dBi、実測で 6.8dBi が得られた。反射係数 S11 は 270GHz-330GHz において -10dB 以下と良好な特性が得られ、シミュレーションと実測もよく一致した。

(2) 1×4 導波管開口アレイアンテナ

1×4 アレイアンテナにした場合は理想的には 6dBi の増加となるので、12.8dBi となる。実際には材料損失や素子間相互結合があり、利得は理想より少し低下する。ビーム角度 0° で利得のシミュレーション値 11.2dBi、実測値 10.4dBi を確認した。また、ビーム角度 10° で利得のシミュレーション値 11.1dBi、実測値 10.6dBi を確認した。目標とする 9dBi 以上となっており、本年度目標を達成した。

(3) 八木・宇田型アンテナ (単素子)

最終目標の 4×4 アレイアンテナでは 2次元に集積する必要がある。このため、導波管開口アンテナよりも集積化に適した基板横方向に放射する八木・宇田型アンテナ素子を提案した。シミュレーションにより、ビーム角度 0° の利得は 7.4dBi (材料損失なし) と導波管開口アンテナと同程度の利得が得られることがわかった。銅の導体損失と誘電体損 (誘電正接 0.02) を考慮すると利得は 6.4dBi となった。反射係数 S11 は 215GHz-320GHz において -10dB 以下と良好な特性が得られた。

(4) 1×4 八木・宇田型アレイアンテナ

前項で説明した八木・宇田型アンテナを 0.7mm ピッチで並べた 1×4 アレイアンテナのシミュレーションを行った。ビーム角度 0° で 12.8dBi (材料損失なし) となり、単素子の 4 倍 (+6dB) の値が得られた。ビーム角度 10° でも 12.7dBi と利得の低下は抑えられることを確認した。

(5) 誘電率測定技術

テラヘルツ時間領域分光システム(TDS)による誘電率測定の精度を上げるために、無限回の多重反射を考慮した誘電率推定手法を開発した。無限回の多重反射を考慮した場合は、有限回のみ多重反射を考慮した場合には生じていた周波数特性のリップルを除去することができた。

1-c) 増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュールを用いた伝送実験

アレイアンテナモジュールの初期評価系を構築し、1-a) で試作した 1×4 モジュールのアンテナ利得・ビーム制御実験を行い、300GHz 帯でアンテナモジュールの特性評価が可能なることを確認することで、2023-2024 年度の伝送実験で用いる試験系構築の目途を得た。

(8) 今後の研究開発計画

令和 4 年度に実施した 1×4 増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュールの試作・評価や 4×4 増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュールの基礎検討の結果を基に、化合物半導体を用いた高出力増幅器とアンテナを 3 次元で集積しアレイ化することで、4×4 増幅器一体型アレイアンテナを試作・評価し、最終目標であるビームスキャン角度±30° における EIRP: 40dBi 達成までの目途を立てる。