

令和5年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：国際戦略局技術政策課研究推進室

評価年月：令和5年8月

1 政策（研究開発名称）

集積電子デバイスによる大容量映像の非圧縮低電力無線伝送技術の研究開発

2 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

・実施期間

令和元年度～令和4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

2,377百万円

令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	総額
619百万円	621百万円	620百万円	512百万円	2,372百万円

予算要求段階では総額10億円超となるか未定だったため、事前事業評価は未実施。

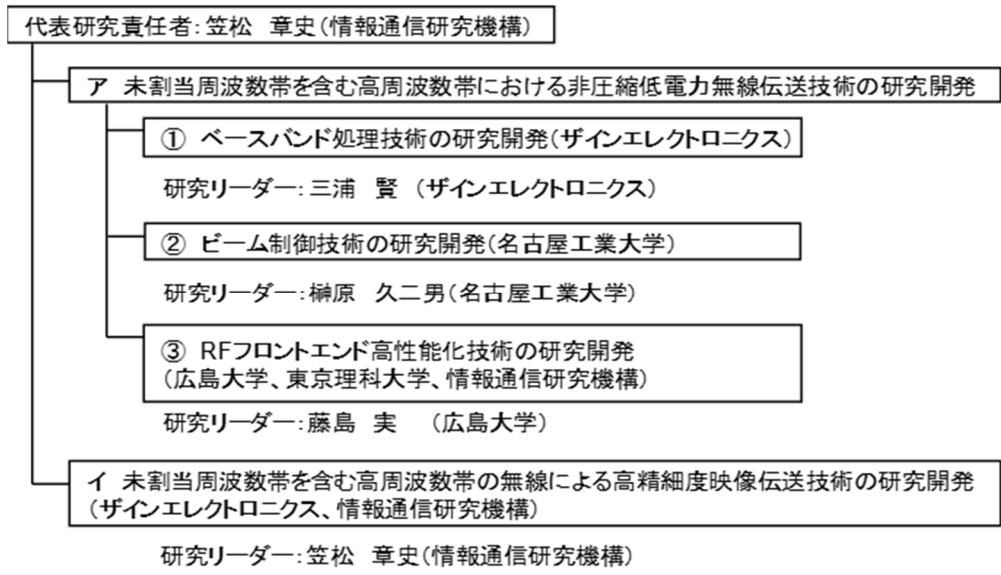
・概要

8K高精細・高分解映像はより美しい映像を視聴できるという以上に医療分野やバーチャルリアリティ等の分野などで大きな意味を持ち、実際に内視鏡手術などの臨床手術などに活用され始めている。しかしながらこれらの応用では有線であることのデメリットも大きく、今後の発展のためには高精細度映像の無線伝送技術の確立が必須である。この観点から、本課題では8K高精細度映像を低遅延で無線伝送する技術を確立し、医療現場における早期診断（早期治療）等に期待される超高精細度映像（4K/8K）を低遅延で無線伝送するため、上記の技術を用いた集積デバイスにより非圧縮、低消費電力、ビーム制御可能な300GHz帯無線伝送システムの開発を実施し、同周波数帯のさらなる有効利用を促進する。

また、275 GHz以上の未割当周波数帯は現在ITU-Rにおいて割当ての検討が行なわれている段階であり、具体的な用途はこれから決まる周波数帯である。したがって用途によっては広い周波数帯域を確保できる可能性が高い。そのため、本研究開発で得られた成果はITU-RおよびIEEEでの技術検討活動に順次入力する。ITU-Rでは、WRC-2019にて275 GHzから450 GHzの高周波数帯を陸上移動及び固定業務に使用するための周波数帯として合意されたほか、様々なユースケースに対する技術要件やこの周波数帯の電波伝搬特性などが研究されており、より本格的な周波数割り当てである分配(allocation)については今後のWRCに向けて議論される見込みであるところ、研究開発成果に基づいて寄書の提出を行う。

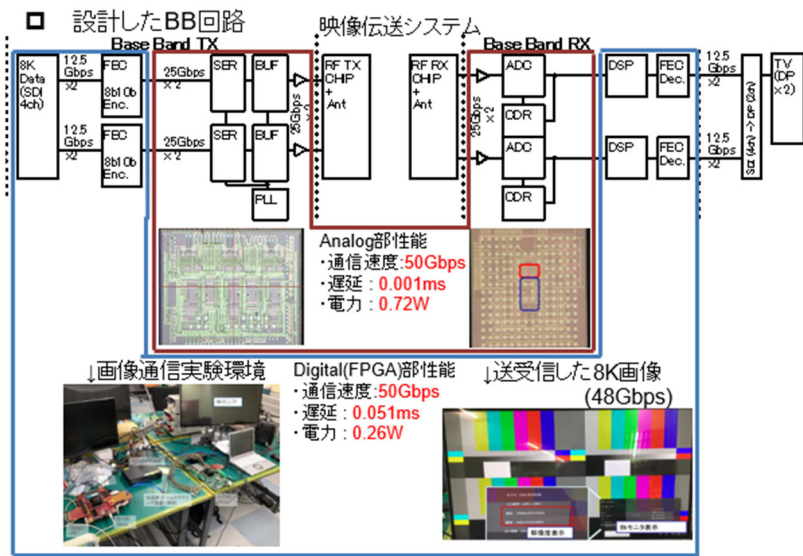


研究開発の全体概要図



研究開発体制の全体概要図

技術の種類	技術の概要
課題ア: 未割当周波数帯を含む高周波数帯における非圧縮低電力無線伝送技術の研究開発	<p>① ベースバンド処理技術の研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ミックスドシグナル技術を用いて 50Gbps の通信速度, 0.1ms 以下の遅延, 1W 以下の消費電力を持つベースバンド(BB)送受信機の開発を行う。 PGAに機能を実装し、TX/RXを設計/試作することで消費電力と遅延を見積もり、目標とした特性を実現 (50Gbps/0.052ms/0.98W)する。 電力削減のため Carrier Recovery (CR)/Clock and Data Recovery(CDR)を統合した受信回路を開発し IF 周波数 20GHz において 10Gbps の通信を実現する。

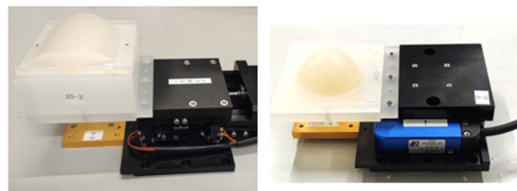


研究開発にて設計した BB 回路

② ビーム制御技術の研究開発

10 度程度のビーム方向制御が可能となる小型・薄型のアンテナシステムの開発を行う。

- ・ 中心周波数 270GHz の 34.56GHz 帯域幅で、10 度 (±5 度) のビーム走査が可能
- ・ 送受とも 4 素子 28dBi の利得を実現する小型 (45 mm×45 mm 以下) ・ 薄型 (高さ 40 mm 以下) のビーム走査アンテナ
- ・ 円筒型レンズを用いたメカ・フェーズドアレー ハイブリッドビーム走査アンテナ
- ・ 円形型レンズを用いたメカ・フェーズドアレー ハイブリッドビーム走査アンテナ
- ・ 円形型レンズを用いた高利得 40dBi 固定ビームアンテナ
- ・ 高誘電率材料を用いてレンズをさらに薄型化
- ・ 導波管狭壁側入力シングルエンド線路変換器



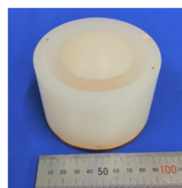
円筒型レンズ

メカ・フェーズドアレー

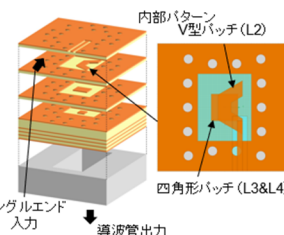
円形レンズ

メカ・フェーズドアレー

研究開発に用いたメカ・フェーズドアレー



固定ビーム高利得
円形レンズ



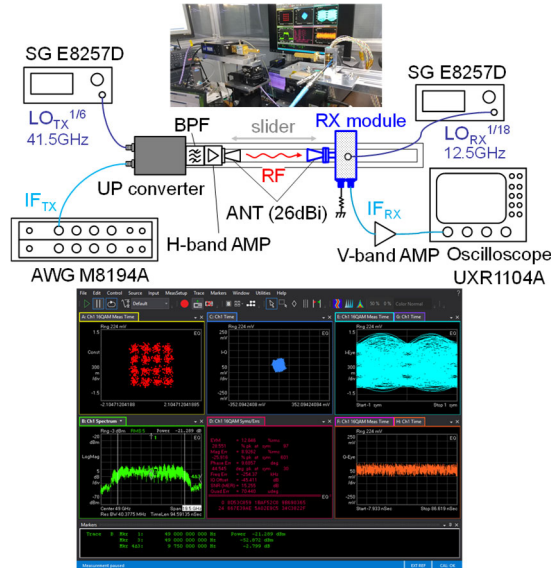
導波管狭壁側入力
シングルエンド線路変換器

研究開発に用いたレンズ及びシングルエンド線路変換器

③ RF フロントエンド高性能化技術の研究開発

34.56 GHz 帯域、毎秒 25 G サンプルの変調信号を処理可能な RF フロントエンドの開発を行う。

- ・ 34.56 GHz 帯域、毎秒 25 G サンプルの変調信号を処理可能な送受信回路を試作
- ・ ビーム制御可能な 300GHz 帯送受信回路において送信-5dBm、受信 NF15dB を実現
- ・ 300 GHz 帯電力増幅器の設計、試作
- ・ 34.56 GHz 帯域、毎秒 25 G サンプルの変調信号を処理可能な送受信回路を実現
- ・ 40nm CMOS プロセスを用い回路により送信-40 dBm、受信 NF 17dB を実現（送信回路は電源線を修正することにより-7.5 dBm の出力電力を確認）
- ・ 0.13 μm SiGe BiCMOS により 300 GHz 帯で 3.2 mW 以上の出力電力を実現

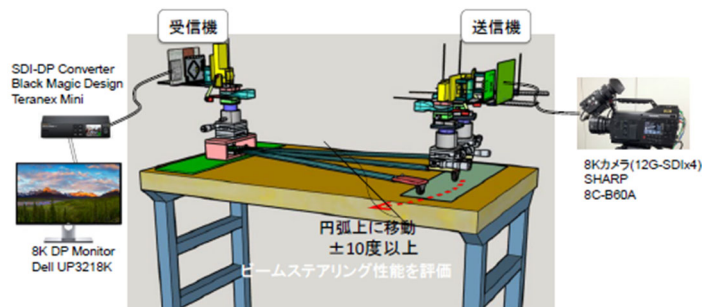


300GHz 帯トランシーバ評価の概要図

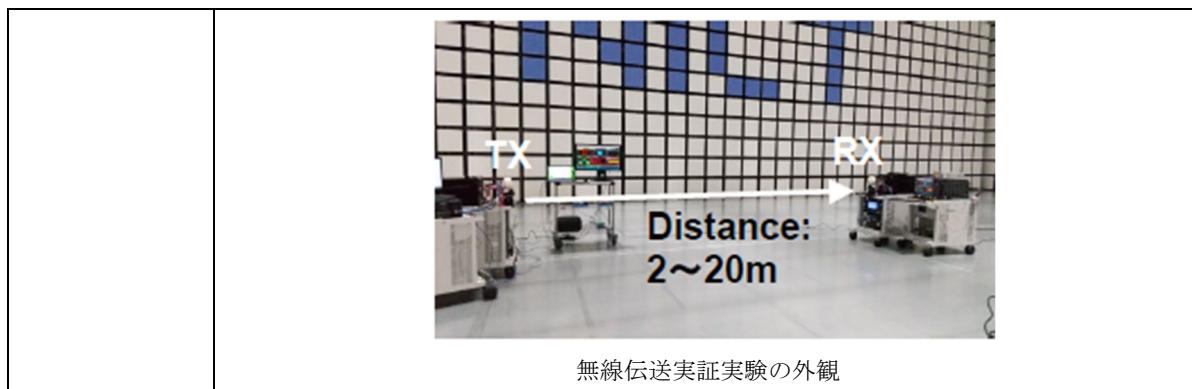
8K 映像の非圧縮 50 Gbps 程度の無線伝送実証実験

- ・ ビーム方向制御アンテナシステム、マルチチップ制御 RF フロントエンド技術、FPGA(Field Programmable Gate Array)を含むベースバンド技術を統合し、通信実験を実施する。
- ・ 開発したベースバンド回路、無線部、画像送信装置・画像表示装置を用いて、最終形態での映像伝送デモを実施する。
- ・ アンテナ、RF、ベースバンドを統合した実験で変復調を確認する。
- ・ 角度 10° 以上 (16°) のビーム制御を実験で確認する。
- ・ 5m 以上の伝送（電波暗室で可能な 20m まで）の伝送を実験で確認する。
- ・ バイアス調整用の SPI-DAC を改良試作し、基本動作を確認する。

課題イ：未割当周波数帯の無線による高精細度映像伝送技術の研究開発



映像伝送デモの全体接続構成外観



・スケジュール

	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度
アー①. ベースバンド処理技術	映像伝送システム方式検討 基本試作 基本設計	映像伝送基本システム実験 試作、デジタル部デモ 二次設計	映像伝送システム予備実験 波形整形回路等作製 最適化設計	映像伝送システム統合実験 実証実験システムへの組み込み、評価
アー②. 300GHzビーム制御技術	ビーム制御基本検討 シミュレーション、評価 基本設計	ビーム制御機構試作 特性評価 二次設計	ビーム制御システム構築 特性評価 最適化設計	実証実験システムへの組み込み、評価
アー③. 300GHz帯RFフロントエンド高性能化技術	低消費電力回路試作 基本設計	集積化チップ試作 二次設計	搬送波発生回路試作 最適化設計	実証実験システムへの組み込み、評価

(2) 達成目標

8K等の超高精細度映像（データレート48 Gbps）を低遅延、低消費電力で無線伝送する需要に向けて、集積回路とビーム制御可能なアンテナシステムによって映像データを非圧縮で伝送する無線通信技術の研究開発を実施する。

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可能性がある、未割当周波数帯を含む高周波数帯を用いて50 Gbps程度の伝送速度を実現し、これにより大容量映像のデータを非圧縮で伝送することで、圧縮・伸張に要する電力を削減しつつ1ms程度の低遅延を実現する。

これを将来普及可能なコストと性能で実現するためには、無線回路、デジタルおよびアナログ信号処理回路を集積化することが必須である。本研究開発は2021年度までにアンテナシステム、8Kインターフェース、無線信号処理の各要素技術を確立し、2022年度に映像伝送実験を行う。

また、確立された要素技術から技術基準策定を行い、次世代映像システムへの適用を目指すことで、高周波数帯の有効利用を促進する。

○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）
<p>未来投資戦略 2018（平成 30 年 6 月 15 日 閣議決定）</p>	<p>第 2 具体的政策</p> <p>I 「Society 5.0」の実現に向けて今後取り組む重点分野と、変革の牽引力となる「フラッグシップ・プロジェクト」等</p> <p>[1] 「生活」「産業」が変わる</p> <p>2. 次世代ヘルスケア・システムの構築</p> <p>(3) 新たに講ずべき具体的施策</p> <p>iv) 先進的医薬品・医療機器等の創出、ヘルスケア産業の構造転換</p> <p>② AI 等の技術活用</p> <p>II 経済構造革新への基盤づくり</p> <p>[1] データ駆動型社会の共通インフラの整備</p> <p>1. 基盤システム・技術への投資促進</p> <p>(3) 新たに講ずべき具体的施策</p> <p>iii) 新たな技術・ビジネスへの対応</p> <p>⑥ 4K・8K の推進</p>
<p>世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（平成 30 年 6 月 15 日 閣議決定）</p>	<p>第 2 部 官民データ活用推進基本計画</p> <p>II 施策集</p> <p>II - (6) 利用の機会等の格差の是正【官民データ基本法第 14 条関係】</p> <p>○[No. 6 - 7] 4K・8K 等の高度な映像・配信技術の利用機会の均等</p> <p>○[No. 9 - 5] 8K 等高精細映像技術の医療応用の推進</p>

(3) 目標の達成状況

各研究課題とも目標を達成することができた。

- ・ ミックスドシグナル技術を用いて 50Gbps の通信速度、0.1ms 以下の遅延、1W 以下の消費電力を持つベースバンド(BB)送受信回路を開発した。
- ・ 1 軸フェーズドアレイ、1 軸機械走査に対応した円筒型レンズを用いたアンテナモジュールを開発した。
- ・ シリコン CMOS で 34.56 GHz 帯域、毎秒 25 G サンプルの RF 回路を実現、SiGe BiCMOS プロセスにより 300 GHz 帯で 3.2 mW 以上の出力電力を実現した。
- ・ 16 度のビーム制御、20m 伝送、8K 映像伝送等を実験で確認した。

ア-① ベースバンド処理技術の研究開発

本課題では、表ア①- 1 に示す目標を達成するベースバンド(BB)の開発を行った。消費電力と遅延に関しては、FPGA に実装した機能と試作した部品(入力バッファ、クロックデータリカバリ (CDR)、AD コンバータ (ADC)、出力バッファ、シリアライザ等)が 1つの集積回路で実現したと仮定して求めた。BB 送受信機の開発と、キャリアリカバリ (CR) と CDR を統合する方式について示す。試作は 22nm シリコン CMOS プロセスを使用した。

表ア①- 1 目標性能と達成状況

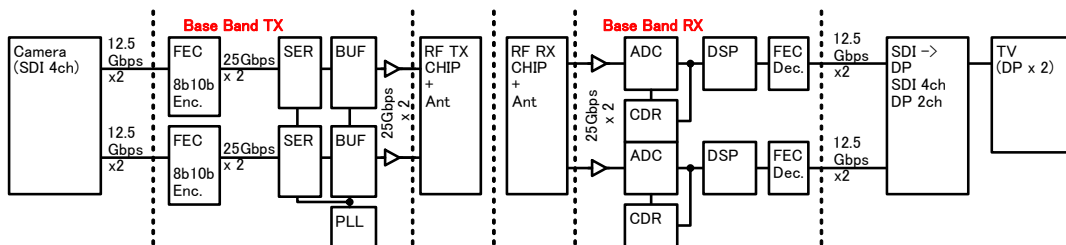
	目標	実施結果	達成状況
通信速度 [Gbps]	50	50	達成
遅延 [ms]	0.1>	0.052	達成
消費電力 [W]	1>	0.98	達成

1 ベースバンドと各課題の関連

全体の構成図を図ア①- 1 に示す。課題ア-①は Base Band TX, RX の部分が該当する。Base Band TX (BBTX)は以下の機能を有している。無線で送受信するものとして 8K 画像データを想定する。

- ・ 画像信号を送信するためにカメラなどの画像データに対してエラー訂正符号の付加
- ・ BBTX-RFTX 間の DC バランスの保持とデータにクロックを追加するための 8B10B 符号化(Encode)
- ・ BBTX-RFTX 間の配線や RFTX の特性に合わせた波形成型機能
- ・ I, Q 信号の位相ずれによるベースバンド信号劣化対策の位相保証回路 Base Band RX (BBRX)は以下の機能を有している。
- ・ エラー訂正符号を使用したビットエラーレート (BER : Bit Error Rate)の改善
- ・ 8B10B 符号を画像データへの変換(Decode)
- ・ RFRX-BBRX 間の配線や RFRX の特性に合わせて波形成型機能 (Analog + Digital 処理で実現)
- ・ 受信した I, Q 信号の CDR を行い送信されたデータの復元

課題ア：未割当周波数帯を含む高周波数帯における非圧縮低電力無線伝送技術の研究開発



図ア①- 1 全体構成図

2 送受信機の開発

2.1 送受信機の開発

BBTX (送信) の消費電力/遅延を以下に示す。ロジック部は FPGA のため測定できないためシミュレーションで遅延と電力を見積もった。アナログ部は各ブロックの消費電力を集計し電力と遅延を求めた。

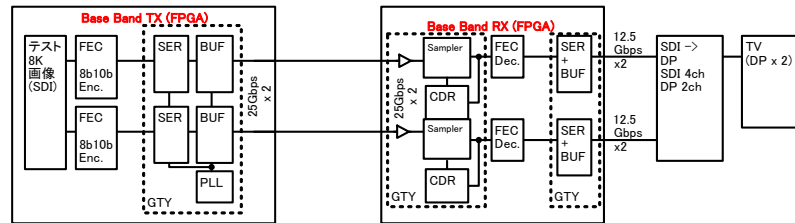
- ・ 消費電力 : 0.38W 内訳 [0.32W (analog) + 0.06W (digital)]
- ・ 遅延 : 1.5 μs 内訳 [0.5 μs (analog) + 1.0 μs (digital)]

BBRX (受信) の消費電力/遅延を以下に示す。TX と同じ方法でアナログ/ロジック部の見積もりを行っている。

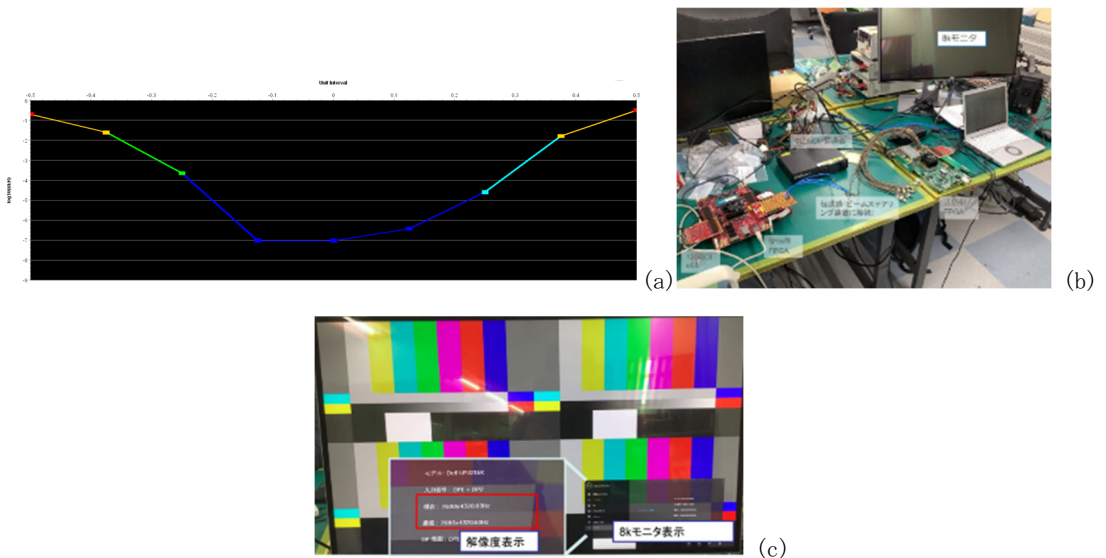
- ・ 消費電力 : 0.60W 内訳 [0.4W (analog) + 0.20W (digital)]
- ・ 遅延 : 50.5 μs 内訳 [0.5us (analog) + 50.0 μs (digital)]

2.2 通信実験

50 Gbps の通信は FPGA を使用して確認を行った。シリアライザと CDR は FPGA (Xilinx 社製) に搭載されているモジュール (GTY) を使用した。評価系を図ア①-2 に示す。BBTX からパターンチェック信号を出力し BBRX で受信した際の BER を図ア①-3(a) に示す。同図の中心でデータを取得すれば BER が最小の $1E-7$ になり、FEC を掛けることでエラーフリーとすることができる。BBTX より 8K (50 Gbps) のテスト画像 (SDI 規格) を作成し、BBRX へ送信し SDI-DP 変換装置を介して 8K モニタに接続した。評価系の写真を図ア①-3 (b) に示す。これらを使用して画像を表示した結果を図ア①-3 (c) に示す。8K 画像が通信されているかの判断は同図(c)の解像度表示で確認した。解像度表示を見ると 7680×4320 となっており、8K 画像が送信されていることが確認できる。以上から 8K (50 Gbps) の通信を実現したことがわかる。



図ア①- 2 評価系



図ア①- 3 (a) BER 測定結果, (b) 評価系の写真, (c) 実験結果

3 まとめ

以上より、本研究課題ア-①の開発目標である「通信速度 50 Gbps、遅延 0.1ms 以下、消費電力 1 W 以下」を達成した。さらに無線通信システム全体の消費電力・コスト削減の取り組みとして CR と CDR を同時に実現する方法を提案した。結果として、通信速度は 10 Gbps において低解像度 (3bit) ADC とアナログ回路を組み合わせた通信システムが実現可能であることを示した。これにより無線通信システム全体の消費電力とシステムコストを低減する方式を示すことができた。

ア-② ビーム制御技術の研究開発

本課題では、少ない IC チップ数で高利得、広帯域、広いビーム走査範囲を実現するため、レンズアンテナをベースとしたビーム走査アンテナを開発した。その第一候補として取り組んだ、機械的な動作機構が部分的に必要となるが、システム全体を回転するのではなくレンズ部のみをわずかに往復運動させるだけで、高

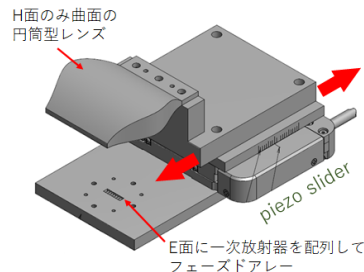
いEIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power: 等価等方放射電力) と、広い角度範囲を2次元ビーム走査が可能となる機械式ビーム走査とフェーズドアレーを組み合わせた方式について、目標に対する性能の達成状況について示す。さらに、これらのレンズアンテナの一次放射器には、レンズへの照射特性を容易に設計が可能なホーンアンテナを用いており、ホーンアンテナの給電に用いている導波管と、高周波 IC との接続用の、平面線路導波管変換回路の開発に取り組んだ結果について示す。

1 機械式ビーム走査とフェーズドアレーを組み合わせた2次元ビーム走査レンズアンテナの開発

レンズを切り替える方式では、すべての送信機から放射した電力が合成されない。また、マルチビーム合成方式も、レベルが低い角度のクロスオーバーレベルを高めて、放射レベルの角度依存性を均一化させる点で優れているが、やはりすべての放射電力が合成されるわけではない。そこで、機械的な走査をするための機能が必要となるが、高いEIRPの実現を優先した方式として、一次元を機械式ビーム走査で、もう一次元をフェーズドアレーによるビーム走査としてそれらを組み合わせた2次元ビーム走査方式を開発した。その達成状況について説明する。

1.1 機械式ビーム走査とフェーズドアレーを組み合わせた2次元ビーム走査方式の構成

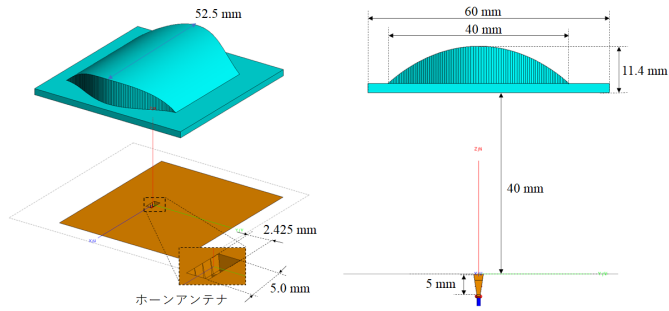
2次元ともフェーズドアレーによるビーム走査で高利得アンテナを実現しようとする、非常に多くの素子数が必要となり、それとともに必要となるICチップ数が多くなってしまふ。そこで、2次元のうち1次元はレンズを用いてビームを絞ることにより高利得化するとともに、機械走査とはいってもシステム全体を回転走査するのではなく、レンズを一次放射器に対してわずかにずらすだけでビーム走査する性質を用いて、図ア②-1.1に示すように、ピエゾモータを用いた往復運動によりビーム走査し、もう一次元はフェーズドアレーでビーム走査する2次元ビーム走査方式とする。



図ア②-1.1 機械式ビーム走査とフェーズドアレーからなる2次元ビーム走査レンズアンテナ

1.2 半円筒型レンズアンテナの構造とその設計

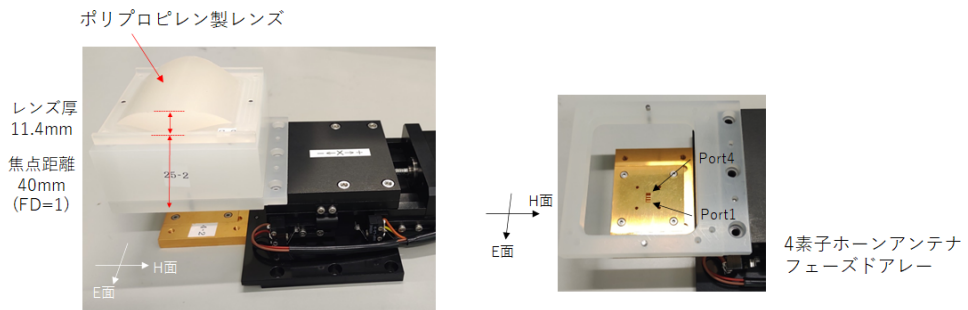
ポリプロピレンを用いて、半円等型の平凸レンズを設計した。その寸法と形状を、図ア②-1.2に示す。また、ホーンアンテナは、レンズの曲面方向をH面とした。E面については、素子指向性を考慮した上で、グレーティングローブが利得に影響しない素子間隔として1.25mmとした。ホーンアンテナ間を仕切る壁面の製造条件を考慮した結果、壁面は開口面よりも低くなり、この影響を考慮して電磁界シミュレーションで特性を評価している。



図ア②-1.2 半円筒型平凸レンズ（ポリプロピレン、F/D 比 1）の形状

1.3 半円筒型レンズを用いたビーム走査アンテナの試作結果

レンズアンテナが、ホーンアンテナのH面長手方向に、ホーンアンテナの開口面と平行な面内に往復運動するように、ピエゾモータ駆動装置を用いた。その装置の写真を図ア②-1.3に示す。レンズがホーンアンテナ面に水平に、なめらかに距離が変化しないよう安定して往復運動するように、レンズと同じポリプロピレン製の内部をくりぬいた角柱でレンズを支える構造とした。

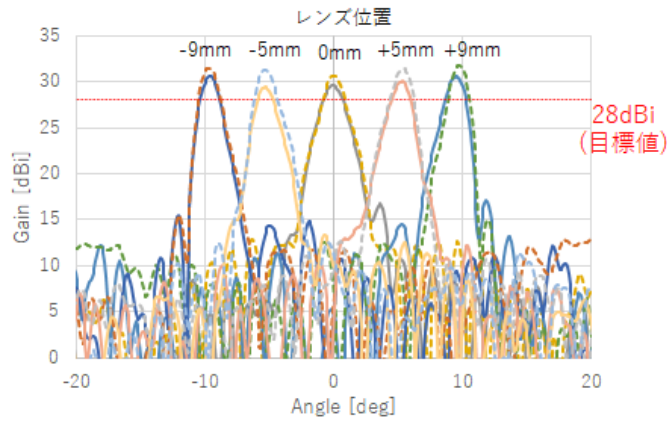


図ア②-1.3 試作したH面機械駆動半円筒型平凸レンズ（ポリプロピレン、F/D 比 1）

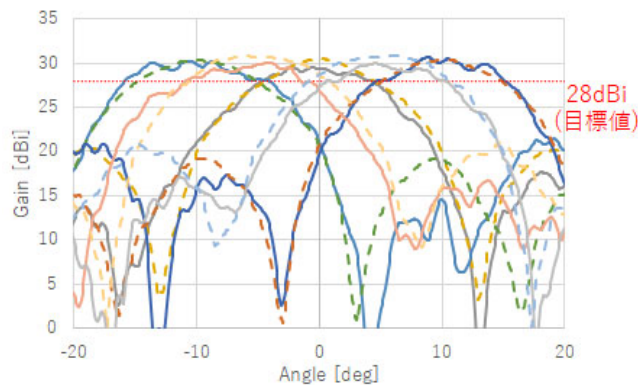
E面フェーズドアレー2次元ビーム走査アンテナ

試作したH面機械駆動半円筒型平凸レンズE面フェーズドアレー2次元ビーム走査アンテナのビーム走査特性を測定した結果を示す。図ア②-1.4に、レンズを連続的にスライドさせたときの指向性を示す。実線が測定結果で、破線がシミュレーション結果である。5つの位置での指向性のみを示しているが、レンズは連続的にスライドできるため、これらの指向性の間も連続的にビーム形成されている。ここではグラフで確認しやすいように5点のみの特性を示している。送信アンテナの目標値 28dBi を±5度の範囲で実現することとしているのに対して、±10度で実現できていることが実験結果で確認できた。

E面のビーム走査については、フェーズドアレーの機能で実現する。アンテナの機能の実験的評価として、レンズを含めた4素子の各素子の指向性を測定し、4つのアンテナ素子に同振幅で、所望のビーム走査とするために必要な位相を与えたときの指向性を計算した。そのようにして求めたビーム走査特性を図ア②-1.5に示す。E面についても、±10度を大幅に超える28 dBi以上のビーム走査特性が得られることが確認できた。



図ア②-1.4 H面機械駆動ビーム走査特性



図ア②-1.5 E面フェーズドアレービーム走査特性

ア③ RF フロントエンド高性能化技術の研究開発

40 nm CMOS プロセスを用いて RF 送信フロントエンド回路、及び RF 受信フロントエンド回路を設計、試作、評価した。また、0.13 μm SiGe BiCMOS プロセスを用いて 300 GHz 帯電力増幅器を設計、試作、評価した。本研究課題における最終到達目標と達成状況を下表に示す。

表ア③ 研究課題ア③の最終目標と達成状況

最終到達目標	達成状況
34.56 GHz 帯域、毎秒 25 G サンプルの変調信号を処理可能な RF フロントエンド	<ul style="list-style-type: none"> ・帯域： 受信器>35GHz ・受信器 76G サンプル/s ※受信器において達成
送信機 <ul style="list-style-type: none"> ・出力チャネル当たり 1 mW 以上 ・最終出力 3.2mW 以上の電力増幅器 	<ul style="list-style-type: none"> ・出力電力の測定結果： -17dBm (0.02mW) ・電源線修正後のシミュレーション結果： -7.5dBm (0.18mW) ・電力増幅器と組み合わせることによって 1 mW 以上の出力電力を達成 ・帯域 34.56 GHz 以上、出力電力 3.2 mW (5 dBm) 以上達成
受信機 <ul style="list-style-type: none"> ・雑音指数 15 dB 以下 ・消費電力 1 回路あたり 2 W 以下 	雑音指数の測定結果：23 dB レイアウト改善後のシミュレーション結果：15dB 達成 消費電力 0.99 W 達成

1 300 GHz 帯電力増幅器の開発

その他、0.13 μm SiGe BiCMOS プロセスを用いて 300 GHz 帯電力増幅器の設計及び測定評価を行い、本研究における 300 GHz 帯電力増幅器の開発目標である「帯域 34.56 GHz 以上、出力電力 3.2 mW (5 dBm) 以上の 300 GHz 帯電力増幅器」を実現した。

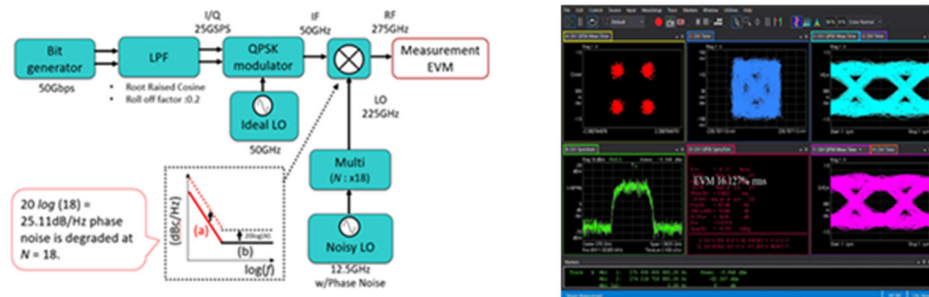
イ① 無線通信システムシミュレーション

RF フロントエンド・ベースバンドの各要素技術の設計仕様・評価結果を統合、無線映像伝送モジュール性能の予測を行うため、リンクバジェット試算を行うとともにシステムシミュレーションを実施した。

(ア) 伝送特性に影響のある項目のシステムシミュレーション

要求仕様（評価指標）は BER、SNR、EVM とし、設計指標に影響がある要因として S/N 比、位相雑音、線形/非線形の信号劣化、Frequency Offset、Phase Offset、I/Q インバランス、DC オフセット、I/Q 信号レベル、Group Delay 偏差を検討した。

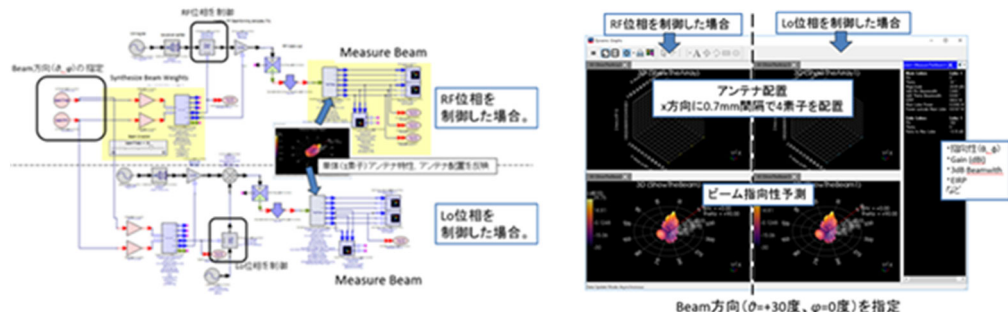
検討例として、局部発信器 (LO) の位相雑音の影響を示す。図イ①-1 のシミュレーション・モデルとシミュレーション結果の例を示す。



図イ①-1 局部発信器 (LO) 位相雑音の影響を 300 GHz 帯のシミュレーション・モデルと結果
(条件：キャリア周波数 275 GHz、シンボルレート 500 Msps、SNR 20 dB、LO 通倍数 18 倍)

(イ) ビームフォーミングのシステムシミュレーション

フェーズドアレーアンテナ特性を反映し、計画されている位相制御方法である局部発信器の位相制御でシステムシミュレーションを行った。図イ①-2 がシミュレーション回路図と結果である。図イ①-2 において上側が RF で位相制御をおこなう場合をシミュレーションしており、下側が局部発信器 (Lo) で位相制御をおこないビーム制御をした場合をシミュレーションしている。



図イ①-2 シミュレーション回路図と結果

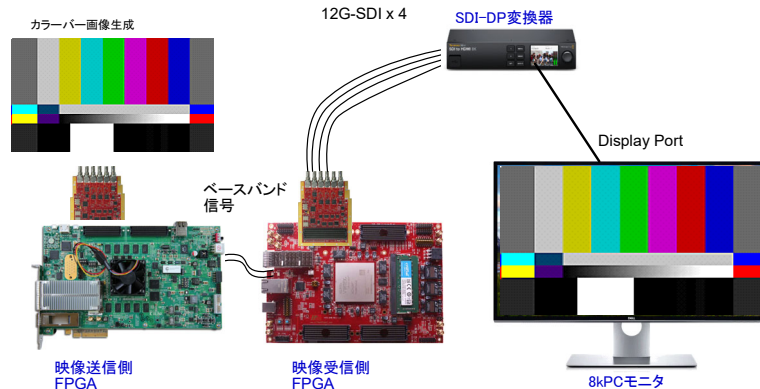
シミュレーション結果のとおり、RF で位相制御した場合及び局部発信器 (Lo) で位相制御を行った場合において、同様にビーム制御が行えることを確認した。

課題イ：未割当周波数帯の無線による高精度映像伝送技術の研究開発

イー② 映像処理部

本課題研究ア-①において、ベースバンド伝送部の伝送遅延を 0.1ms 未満とする目標を立てた。本目標を達成するためのエラー訂正符号を含む映像信号処理部の開発を実施した。

図イ②-1 に映像処理部の全体構成図を示す。映像送信側 FPG でカラーバーのテスト画像を生成し、誤り訂正符号の付加、伝送路符号化等の処理を行い、25 Gbps 差動出力 2 本で出力する。(この出力を無線伝送システムで送受信することを想定している) 受信側では、25 Gbps 差動 2 本で受信した信号を復号化、エラー訂正等の処理を行った上で、SDI 信号の符号化を行い、12G-SDI 4 本で出力する。SDI から Display Port に変換する装置を経由し、Display Port インターフェースの 8K PC モニタで映像を表示する。



図イ②-1 映像処理部全体構成図

設計の結果、映像送信側 FPGA の伝送遅延は $1\mu s$ 、映像受信側 FPGA の伝送遅延は $50\mu s$ であった。アナログ部を含めてベースバンド伝送部の伝送遅延 $0.1\mu s$ を達成した。

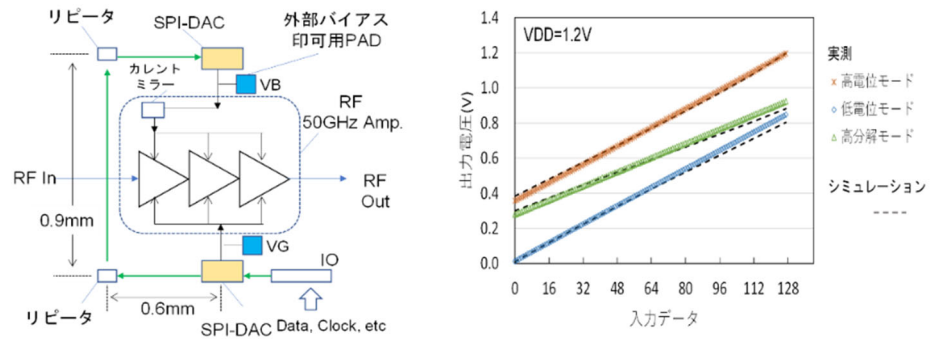
イー③ オンチップ・バイアス調整回路

300 GHz 帯の安定な無線伝送に必要なキャリブレーション技術の一部として、RF フロントエンドに搭載可能なオンチップ・バイアス調整回路技術の開発を行った。

回路方式は、Serial/parallel-Interface (SPI) の DAC 回路 (SPI-DAC と記す) とし、電子ボリューム型回路方式により小面積化と低ノイズ化の両立を図った。また、大規模 RF フロントエンドへの組み込みに対応すべくデジタル信号のリピータ回路を設けた。

本技術の有効性確認のために、小規模な RF 回路 (50GHz アンプ) に SPI-DAC を組み込んだ TEG を試作評価した。図イ③-1 に TEG の回路構成と SPI-DAC の電圧特性を示す。縦軸のマークは実測結果、破線はシミュレーションである。高電位、低電位、高分解のいずれのモードでも、実測とシミュレーションは良好な一致を示した。ノイズについては、分解能より十分小さい $1mV_{pkpk}$ 以下となった。また、RF 回路に外部電源からバイアス電圧を与えた場合と、SPI-DAC からバイアス電圧を与えた場合の、利得周波数特性を比較した。その結果、設計した SPI-DAC により、外部電源によるものと同等の性能が得られた。

RF フロントエンドへ搭載可能な、オンチップ・バイアス調整回路技術を開発した。設計目標と試作結果を表イ③-1 にまとめた。本回路の技術目標は達成できた。



図イ③-1 TEG の回路構成と SIP-DAC の電圧特性

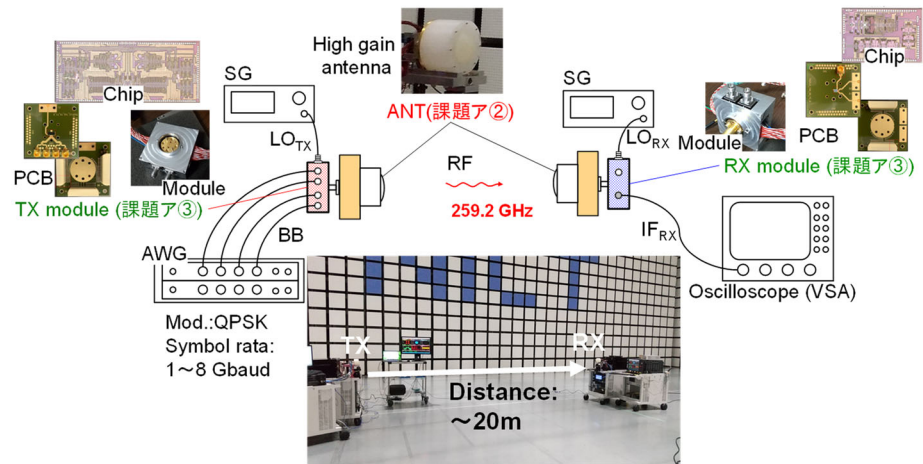
表イ③-1 SPI-DAC の回路目標と試作結果

	目標	試作結果
出力階調	128	128
回路面積 (um ²) (シュリンク前の数値)	300x150	159x108
平均分解能 (mV)	5	5.1
低ノイズ	<<分解能	<<1mVpkpk

イ-④ 無線伝送実験

1. 伝送距離検証実験

伝送距離性能を確認するための無線伝送実験を NICT の大型電波暗室で行った。具体的にはアンテナ (課題ア-②) と RF フロントエンド回路 (課題ア-③) を統合して実験を行った。実験構成を図イ④-1.1 に示す。



図イ④-1.1 伝送距離検証実験の構成

結果として QPSK 変調で、5m で 5 Gbaud, 10 Gbps の伝送距離を実証、20m で 1 Gbaud, 2 Gbps の伝送距離を実証できた。図イ④-1.2 に、QPSK を使用した信号コンスタレーションとエラーベクトルの大きさ (EVM) を示す。距離 5m、データレート 10 Gbps のときの EVM は、誤り訂正可能な 10^{-3} 未満のビットエラーレートの基準を満たしている。

		Data rate	2 Gbps	4 Gbps	6 Gbps	10 Gbps
Distance: 5 m	Constellation (Equalized)					
	EVM		22.14 %rms	24.27 %rms	25.51%rms	27.37 %rms
Distance: 20 m	Constellation (Equalized)					
	EVM		29.24 %rms	39.75 %rms	53.52 %rms	

図イ④-1.2 伝送距離検証実験における信号コンスタレーションとエラーベクトルの大きさ

2. ビームステアリング実験

2-1. メカニカル(機械式ビーム走査)アンテナによるビームステアリング実験

課題ア②により開発されたメカニカル(機械式ビーム走査)アンテナと課題ア③により開発した送受信無線機モジュールを利用し、ビームステアリング実験を実施した。

距離 65 cmに離れたスライダステージ上に課題ア③で開発した無線機モジュールを配置し、送信側に課題ア②による機械式ビーム走査アンテナを設置した。ビームステアリングの評価は、送信機モジュールを回転させてビームの入射方向を変えた状況で、機械式ビーム走査アンテナの指向性の調整により無線リンクの信号強度や品質を測定することで行った。この実験結果より、本課題研究で目標とした $\pm 5^\circ$ のビーム制御を超えるメカニカルアンテナによる $\pm 16^\circ$ のビームステアリング技術の実証に成功した。

2-2. フェーズドアレイ無線機によるビームステアリング実験

課題ア③により開発されたが受信機チップ(回路性能:SSB NF 約 24dB)を用いてフェーズドアレイ無線機を開発し、ビームステアリング実験を実施した。このフェーズドアレイ機構と円筒型レンズアンテナと組み合わせることで、ビーム入射方向を任意に制御するビームステアリングを可能としている。この実験結果より、開発したフェーズドアレイ無線機によるビームステアリング技術の実証に成功した。 $\pm 14^\circ$ のビームステアリングを達成しており、本課題研究で目標とした $\pm 5^\circ$ のビーム制御を超える成果が得ることができた。

3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、公募を行う際に定められた基本計画書に記載された目標指数や、論文数や特許出願件数などの間接的な指標を基に、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(第115回)」(令和5年6月)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、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査し、必要性・有効性等を分析した。

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、各開発技術に関する特許を出願するなど成果展開に必要な技術を確実に確立しており、また、ITU-T における寄書提案を行うなど、国際標準化に貢献しており、本研究開発の必要性、有効性等が認められる。

主な指標	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0件(0件)	1件(0件)	2件(1件)	4件(4件)	7件(5件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	0件(0件)	4件(4件)	19件(19件)	10件(10件)	33件(33件)
その他の誌上発表数	1件(1件)	1件(0件)	2件(0件)	0件(0件)	4件(1件)
口頭発表数	2件(0件)	22件(5件)	34件(9件)	33件(5件)	91件(19件)
特許出願数	1件(0件)	10件(0件)	10件(0件)	3件(0件)	24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	0件(0件)	15件(15件)	18件(18件)	11件(11件)	44件(44件)
国際標準獲得数	2件(2件)	0件(0件)	0件(0件)	3件(3件)	5件(5件)
受賞数	1件(0件)	2件(0件)	3件(1件)	1件(1件)	7件(1件)
報道発表数	0件(0件)	0件(0件)	1件(0件)	0件(0件)	1件(0件)
報道掲載数	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)	0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	<p>2018年12月に8Kの実用放送が始まり、今後は8K等の高精細度映像の普及が加速していくものと考えられる。高精細度映像の利用はテレビ放送に限らず、医療現場における早期診断・早期治療やヘッドセットディスプレイ、e-sports等多くの分野への応用が期待されているが、映像伝送インターフェースが有線であることによる制約が存在する。また、特に医療分野やヘッドセットディスプレイへの応用では、自由な動きを制限しないという観点から無線化の要求は高い。高精細度映像はデータ量が膨大になるため、これをマイクロ波などで無線伝送する場合には必ずデータ圧縮する必要があり、データ圧縮に伴う遅延や消費電力の増大が問題となる。このような問題を解消するには超高精細度映像のような大容量映像を非圧縮で無線伝送する技術が必要である。これを実現するためには現在周波数割当がされておらず、広い帯域を確保できる275 GHz以上の周波数帯を含む高周波数帯を用いて、超高精細度映像を圧縮処理の大きな負荷をかけずに、低消費電力で無線伝送することが可能な無線伝送システムの研究開発が必要になる。</p> <p>また、政策的位置付けとして、「未来投資戦略2018」（平成30年6月15日閣議決定）、「世界最先端IT国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画」（平成29年5月30日閣議決定）において、4K・8K等の高度な映像・配信技術の利用や8K等高精細映像技術の医療応用の推進について掲げられている。</p> <p>本研究開発によって得られた大容量映像を非圧縮で無線伝送する技術により、8K等の高精細度映像機器およびコンテンツの普及を進めることで国民が享受する情報通信の価値を高めるとともに、我が国の産業振興を見込めることから、必要性があったと認められる。</p>
効率性	<p>複数者の保有する得意な技術を持ち寄り、国際競争に勝てる最先端技術を集積することで1者単独開発では難しい効率的かつ迅速な研究開発を可能とした。各者の代表研究者・実務担当者が集まってプロジェクト推進会議等を開催し、各者の進捗状況や課題を共有・調整して迅速に判断する体制の下で研究開発を推進した。また、各課題について、年に2回程度、外部の有識者と研究受託者から構成される運営委員会を開催し、研究進捗や進め方に対して適切な助言・提言を頂くことにより、研究開発の効率的な運用を行った。</p> <p>委託経費の執行に当たっては、事前に予算計画書を確認するとともに、年度途中及び年度末に経費の執行に関して、総務省担当職員が詳細な経理検査を行い、予算の効率的な執行に努めた。加えて、専門的知見を有した監査法人に経理検査の補助を依頼し、経費執行の適正性・効率性を確保している。</p> <p>以上より、当初予算計画に対して当初目標の仕様を大幅に上回る機能・性能を達成し、効率性の高い研究開発成果を創出できたことから、本研究開発には効率性があったと認められる。</p>
有効性	<p>本研究開発は、300 GHz帯のテラヘルツ波を用いた無線通信システムにおいて、ビーム制御機能等の技術を確立することにより、高周波数帯における移動体無線通信を可能にするものである。また、具体的に高精細映像伝送を対象とし、そのためのベースバンド処理部の開発を含んでいる。本研究開発で取り組むビーム制御技術は、300 GHz帯といった高い周波数ではほぼ前例の無い取り組みであり、レンズとフェーズドアレーの技術を組み合わせることで実現しようとしている。ここで開発された技術をテラヘルツ波用装置全般に展開できれば、テラヘルツ波無線システムの今後の発展に大きく寄与することができる。将来的に想定される具体的な製品・サービスとしては、以下のように超薄型8Kテレビや映像コンテンツ制作機器、新型エンタテインメント等が挙げられる。本研究開発はこのようなユースケースの実現に寄与するものであり、有効性があったと認められる。</p> <p>○ 超薄型8Kテレビ</p> <p>テレビのディスプレイは、近い将来に壁面一体型や窓枠一体型といった超薄型パネルが実用化される。この場合、超薄型パネルには直接搭載できる部品に制限があるため、チューナと録画（メモリ）機能は別筐体となる可能性が高い。ディスプレイと別筐体の間は遅延のない伝送が求められ、8Kを非圧縮で伝送するためにはテラヘルツ無線が有望である。テレビ映像の無線伝送については、過去にもマイクロ波やミリ波での実用化が検討されたが、主流に至らなかった経緯がある。しかし、近年になって従来にないディスプレイパネル形状の薄型化が進んでおり、これまでの状況と異なり無線化が真に望まれる状況となりつつある。</p> <p>○ 映像コンテンツ制作現場・機器</p> <p>カメラから映像サーバへの映像データ伝送は、現在、有線接続が主流であるが、無線化によって配線の取り回しの制約が軽減される。中継車内の装置間の伝送が無線化できれば、相当な重量を占めているケーブルを廃して大幅な軽量化が達成できる。</p> <p>○ 新型エンタテインメント</p> <p>AR (Augmented Reality), VR (Virtual Reality)において、没入感を高めるために高精細映像を低遅延で伝送する必要があり、ゴーグルへの映像伝送を無線化することで移動性や装着感の向上を図ることができる。</p>
公平性	<p>本研究開発の成果である集積電子デバイスによる大容量映像の非圧縮低電力無線伝送技術は、我が国の社会・経済活動を支える情報通信インフラの持続的な維持・発展に貢献できるものであり、受託者</p>

	<p>や関係者のみならず、広く国民に利益が享受されるものである。</p> <p>また、支出先の選定に当たっては、実施希望者の公募を広く行い、研究提案について外部専門家から構成される評価会において最も優れた提案を採択する企画競争方式を採用したことから、競争性を担保している。</p> <p>よって、本研究開発には公平性があったと認められる。</p>
優先性	<p>8K 高精細・高分解映像はより美しい映像を視聴できるという以上に医療分野やバーチャルリアリティ等の分野などで大きな意味を持ち、実際に内視鏡手術などの臨床手術などに活用され始めている。しかしながらこれらの応用では有線であることのデメリットも大きく、今後の発展のためには高精細度映像の無線伝送技術の確立が喫緊の課題となっており、光アクセス網においても多様化する通信需要をより効率的に収容することが必要とされていた。</p> <p>また、275 GHz 以上の未割当周波数帯は現在 ITU-R において割当ての検討が行なわれている段階であり、各国においても国家プロジェクトとして大規模かつ戦略的な研究開発が行われているところ、ITU-R 等において国際標準化競争が展開されており、我が国が世界において優位性を確保するためにも優先的にこれに取り組む必要があった。</p> <p>よって、本研究開発には、優先性があったと認められる。</p>

5 政策評価の結果（総合評価）

8K 等の高精細度映像の利用はテレビ放送に限らず、医療現場における早期診断、早期治療やヘッドセットディスプレイ、e-sports 等多くの分野への応用が期待されているが、映像伝送インターフェースが有線であることによる制約が存在する。また、医療分野やヘッドセットディスプレイへの応用では自由な動きを制限しないという観点から無線化の要求は高い。データ量が膨大な高精細度映像をマイクロ波等で伝送する場合にはデータ圧縮する必要があり、圧縮に伴う遅延や消費電力の増大が問題となる。このような問題を解消するには超高精細度映像のような大容量映像を非圧縮で無線伝送する技術が必要である。これを実現するためには、現在周波数割当がされておらず広い帯域を確保できる 275 GHz 以上の高周波数帯を用いた無線伝送システムの研究開発が必要となっている。

本研究開発においては、アンテナシステム、8K インターフェース及び無線信号処理の各要素技術を確立することにより、高周波数帯を用いた 50 Gbps 程度の無線伝送を実現し、膨大な映像データを非圧縮で伝送することで、電力を削減しながら大容量映像のデータを 1ms 程度の低遅延で伝送することを可能にした。これにより、超高精細度映像の無線伝送への対応をマイクロ波やミリ波で行った場合の周波数ひっ迫の深刻化を回避するとともに、未利用周波数帯である高い周波数帯の利用促進を図ることが期待される。また、外部有識者からなる評価会において、本研究開発の成果技術は新たなサービスを生み出す基盤となるものであることから、総合的に見て有益であった旨の評価を得ていることもあり、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>

評価結果を踏まえ、今後は受託者において本研究開発を進めるとともに、国の後継プロジェクト等を活用してさらなる技術の発展を目指す。引き続き知財確保や標準化活動を推進することで、高周波数帯における無線伝送技術の国際的優位性を目指すとともに、これらについて追跡調査等でフォローアップしていく。

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（第115回）」（令和5年6月）において、目標の達成状況や得られた成果等について、研究開発の目的・政策的位置付け及び目標、研究開発マネジメント、研究開発成果の目標達成状況、研究開発成果の社会展開のための活動実績並びに研究開発成果の社会展開のための計画などの観点から、外部評価を実施し、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。

- ・300GHz 帯非圧縮低電力無線伝送技術の研究開発として、FPGA に機能を実装し、TX/RX を設計／試作し、50Gbps/0.052ms/0.98W と目標達成している。また、10 度程度のビーム方向制御が可能となる円筒型・円形型レンズを用いたメカ・フェーズドアレイハイブリッドビーム走査アンテナと円形型レンズを用いた高利得40dBi 固定ビームアンテナを開発、34.56GHz 帯域、毎秒25G サンプルの変調信号を処理可能な送受信回路を実現、16 度のビーム制御、20m 伝送、8K 映像伝送等を実験で確認し、目標を達成している。計画通り研究開発がなされており、予算は効率的に使用されたと思われる。また、標準化活動として、ITU-R WP5A では、レポート M.2417-0 の改定案を提案、WP5C では、レポート F.2416-0 の改定案を提案している。APT-AWG では「252-296GHz 帯で運用するポイント・ツー・ポイント型無線通信システム」に関するレポート作成に向けた作業文書の提案を行った。IEEE802.15. TG3mb において、IEEE Std 802.15.3d-2017 の周波数帯の拡張(252-325GHz→252-450GHz)、変調方式の拡張等の改正作業を実施している。以上、総合的に見て有益であったと思われる。
- ・8K 等の超高精細度映像を低遅延、低消費電力で無線伝送するために、未割当周波数帯を含む高周波数帯を用いて 50Gbps 程度の伝送速度を実現し、大容量映像のデータを非圧縮で伝送することで、圧縮・伸張に要する電力を削減しつつ 1ms 程度の低遅延を実現するための研究開発である。50Gbps の通信速度、0.1ms 以下の遅延、1W 以下の消費電力を持つベースバンド (BB) 送受信回路を開発し、目標に合致したアンテナモジュール、RF 回路を開発しており、各研究課題とも目標を達成している。本研究開発の成果技術をテラヘルツ波用装置全般に展開すれば、テラヘルツ波無線システムの今後の発展に大きく寄与すると想定され、本研究開発は有益であったと判断する。

7 評価に使用した資料等

- 未来投資戦略 2018-「Society 5.0」 「データ駆動型社会」 への変革-（平成 30 年 6 月 15 日 未来投資会議）
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/miraitousi2018_zentai.pdf
- 世界最先端 IT 国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（平成 30 年 6 月 15 日閣議決定）
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/12187388/www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20180615/siryoul.pdf>
- 電波資源拡大のための研究開発の実施
<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/>
- 平成 31 年度における電波資源拡大のための研究開発及び異システム間の周波数共用技術の高度化に関する研究開発の基本計画書（案）に対する意見募集の結果及び提案の公募（基本計画書）
https://www.soumu.go.jp/main_content/000606922.pdf