

2 Beyond 5G に向けた NICT の取組 ～Beyond 5G Ready ショーケースでの展示～

2 NICT Activities towards Beyond 5G ～Exhibitions at Beyond 5G Ready Showcase

- 2-1 “今だけ・ここだけ・あなただけ” デジタルツインサービスを実現する時空間同期×ミリ波・テラヘルツ超スポット通信技術**
- 2-1 “Only Now, Only Here, & Only for You (IMA-KOKO) ” Digital Twin Services utilizing Space-Time Synchronization and Millimeter-Wave/Terahertz Ultra-Spot Communication Technologies**

莊司 洋三 磯谷 亮介 近藤 啓太郎 Nguyen Duc Phuc 鈴木 藍礼 福間 恵 丸山 一博
横山 亜生 穂吉 ことね 後藤 明日香 志賀 信泰 安田 哲 井戸 哲也
諸橋 功 原 紳介 関根 徳彦 石津 健太郎

SHOJI Yozo, ISOGAI Ryousuke, KONDO Keitaro, NGUYEN Duc Phuc, SUZUKI Aire, FUKUMA Megumi, MARUYAMA Kazuhiro, YOKOYAMA Aoi, AKIYOSHI Kotone, GOTO Asuka, SHIGA Nobuyasu, YASUDA Satoshi, IDO Tetsuya, MOROHASHI Isao, HARA Shinsuke, SEKINE Norihiko, and ISHIZU Kentaro

本稿では、分野横断的な研究開発プロジェクト「“今だけ・ここだけ・あなただけ” テラヘルツ超スポット×時空間同期 Beyond 5G サービス基盤」による、Beyond5G 活用社会をイメージするミリ波・テラヘルツ超スポット通信技術を使用した総合展示システムとその技術について紹介する。

This paper describes the comprehensive exhibition system and its underlying technologies that utilize Millimeter-Wave/Terahertz Ultra-Spot Communication Technologies, envisioning a Beyond5G-enabled society, developed through the cross-disciplinary research and development project “Only Now, Only Here, & Only for You: Terahertz Ultra-Spot and Space-Time Synchronization Beyond 5G Service Platform”.

1 はじめに

少子高齢化による労働人口の減少、医療・介護費の増大に伴う社会保障制度の持続可能性、地方の人口流出と都市部への一極集中、そして若年層・労働層における社会的孤立や「ひきこもり」状態の顕在化など、我が国が直面する社会的課題は多岐にわたる。NICT が研究開発を推進する、Beyond 5G / 6G 通信技術、高精度な無線による時空間同期技術、AI やその利活用技術、ロボット等自律型モビリティの利活用技術、そしてデジタルツイン構成技術などは、いずれも上記のような、今後の日本社会が直面する課題の解決に大きく貢献し得る領域であり、サイバー空間とフィジカル空間の融合による持続可能で強靭な社会として提唱されている Society 5.0 を実現するためにも、技術革新と社

会実装の両面からの取組が求められている。

2030 年代の我々の暮らしとされている Beyond 5G 社会では、上述したような社会課題と密接に関連する分野に加えて、教育・エンターテインメントといった分野においてもサイバー空間とフィジカル空間の融合によって提供可能となるサービス、すなわちサイバーフィジカルシステムを活用したサービスの導入が急ピッチで進むと予想されている。多くの社会的課題は、情報通信技術による遠隔支援、バーチャルな居場所の提供、個別最適化されたサービスなどと親和性が高く、NICT が取り組む無線通信技術、デジタルツイン構成技術、時空間同期技術の応用可能性も高い領域である。一方で、単なるこれら技術の性能や機能の進化ばかりにとらわれるのではなく、社会課題の解決や新たな価値の創造に資する方向へと技術を進歩させるという目

2 Beyond 5G 向けた NICT の取組～Beyond 5G Ready ショーケースでの展示～

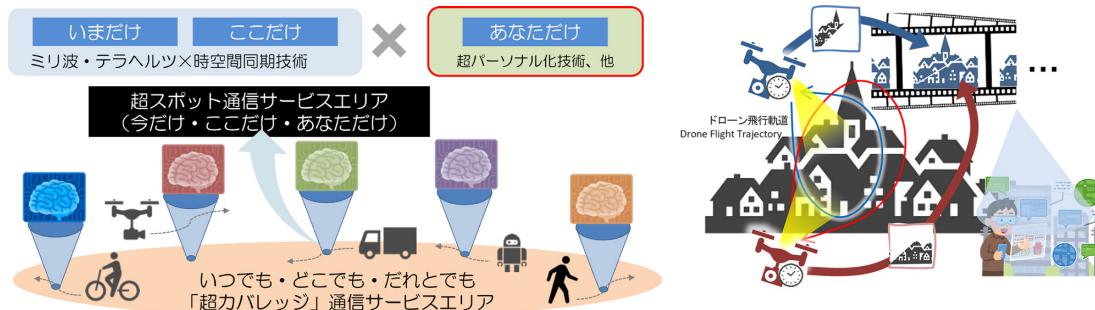


図1 “今だけ・ここだけ・あなただけ”デジタルツインサービス基盤のイメージ

的を強く意識しながら、技術開発者のみならず、その利用者やサービスの提供者が一体となって初めて可能となる実証的な研究開発をより強力に推進すべきである。

Beyond 5G社会における課題の解決に寄与することが期待される分野に、ロボット、ドローン、自動運転車両などの自律型モビリティ技術があるが、これらモビリティが自律的に振る舞うためには、高度な移動に関わる推定・予測・制御機能に加え、他のモビリティやユーザーとの協調活動を支えるためのAI技術のより一層の進化が期待されている。さらに、こうした自律型モビリティとユーザーの間や、自律型モビリティと高負荷なデータ処理を担うために敷設された固定的な情報処理基盤との間では、超大容量のデータを極めて短時間かつ低遅延で無線伝送するニーズが急速に高まるであろう。これに応えるためには、ミリ波・テラヘルツといった超高周波帯を用いた無線通信技術の活用が不可欠となる。また、遠隔に位置するモビリティ群や機器同士が高度な協調動作を行うためには、互いの時間・空間の基軸を高精度に同期させる必要があり、これを可能にする時空間同期技術の高度化も重要な研究要素となる。特に、物理空間におけるモビリティや機器の状態が高速かつ頻繁に変化する環境では、サイバー空間上での認識状態と物理空間の実状態を時間・空間の両軸で同期させることが、高精度な推定・予測処理の実現に直結する。

従来、整備されてきた電気・水道・電話・公共交通機関などの公共性の高い社会基盤と同様に、移動通信サービスも現代ではユニバーサルサービス基盤の一つとして定着しており、ほぼすべての国民が携帯電話やスマートフォンを保持し、無線によってインターネットにアクセスすることが当たり前の時代となっている。今後は、サイバー空間とフィジカル空間が融合したサイバーフィジカルシステムが、社会課題の解決や新たな価値創出の主役となることが期待されており、その実現には、物理空間で発生した極めて大容量の情報を扱える無線通信基盤と、AI技術を駆使してこれら物理



図2 『今だけ・ここだけ・あなただけ』をコンセプトとするプロジェクトの広報イメージキャラクター“今こちゃん”も開発。万博における「今だけ・ここだけ・あなただけデジタルツインサービス実現技術」展示ブースにおいて活躍。（“今こちゃん”の顔は、前髪の縁と鼻・口の部分が「今」の文字で、目の部分が「ここ」の文字で形作られている。）

空間の現象に関わる推定・予測処理を行うサイバー空間でのデータ処理基盤、この両方の基盤をとりもつ時空間同期基盤が不可欠である。

しかしながら、このような基盤を「いつでも・どこでも・誰(と)でも」利用可能な社会インフラとして整備するには、国民に多大なコスト負担が生じるとともに、省エネルギーの観点からも社会の持続可能性を損なう恐れがある。特に、ミリ波・テラヘルツ通信は原理的に大容量通信を可能とする点で有効であるものの、自由空間伝搬損失の大きさ、強い指向性、未成熟なデバイス技術(特に増幅器)などの課題があり、広域かつ常時接続可能な環境の構築には高価な基地局の大量敷設が必要となるため、経済的な制約が大きい。

このような背景から、広域サービスではなく、「今だけ・ここだけ・あなただけ」に超カスタマイズされた局所的なサービス提供空間を分散配置するという新たな社会基盤構想に筆者らは行き着いた(図1、2) [1]。本構想は、従来の「いつでも・どこでも・誰(と)でも」享受できるサービス基盤に重畳する形で、エリアは極めて限定的であるものの、その場所では極めて高速な通信環境の提供と同時に極めて高い付加価値のサービスが提供される“超スポット”的分散配置を基本とする。本構想を基本原理とした分野横断的な研究開発プロ

ジェクト「“今だけ・ここだけ・あなただけ” テラヘルツ超スポット×時空間同期 Beyond 5G サービス基盤」研究開発プロジェクトは、令和 5 年度 NICT 内部での「NEXT」の一プロジェクトとしても正式に採用され、始動した。

本プロジェクトの進捗や成果の一部は、世界最大級のモバイル関連技術展示会である MWC Barcelona 2025 や、大阪・関西万博会場内において 2025 年 5 月 26 日から 6 月 3 日の期間で設けられた「Beyond 5G Ready Showcase」において、動態展示として公開されるに至った。

2 以降では、まず Beyond 5G を構成する技術のひとつである時空間同期技術の原理について概説した後、同技術の一応用として、2025 大阪・関西万博（以下、大阪・関西万博）にも展示された多視点撮影システムについて述べる。次にテラヘルツの超大容量性を活かした 4K 非圧縮映像伝送システムについて述べる。その後、移動体がミリ波やテラヘルツといった超大容量性を有する無線通信技術を利用するため開発された IEEE802.15.3e/d 標準の内容、これに準拠した 60 GHz ミリ波帯無線通信システムチップ（SoC: system on chip）の開発状況及び世界初となる 300 GHz テラヘルツ帯対応 CMOS ミキサについて述べる。最後に、これらを統合することで可能となった、大阪・関西万博で動態展示された 60 GHz ミリ波帯・300 GHz テラヘルツ帯超スポット通信技術による自律型モビリティ大容量データ伝送システムの内容について述べる。

2 時空間同期技術 Wi-Wi とその応用

2.1 時空間同期技術 Wi-Wi の原理

時空間同期技術 Wi-Wi (Wireless Two-Way Interferometry: 無線双方向時刻比較技術) とは、電波を双方向にやり取りし、その往復伝搬時間と搬送波の位相を干渉計測することで、機器間の時刻差と距離を同時に計測する技術である [2][3]。

GNSS が届きにくい屋内や都市環境でも、Wi-Wi は無線通信だけでナノ秒精度の時間同期とミリメートル精度の位置同期を実現できる。

原理的には、2 台の機器が互いに基準信号を送受信し、その位相差や遅延を解析することで、往復の時間差から「相対的な時刻」と「距離」が同時に決定される（図 3）。時間のズレを 1 億分の 1 秒、位置のズレをミリメートル単位で検出・補正できることにより、離れた場所にある複数の機器が「同じ時計」と「同じ座標軸」を共有できるため、ドローンなどの複雑な動きをする移動体やカメラ群も一体的に動作させ、現実の出来事を途切れることなく観測することが可能になる。

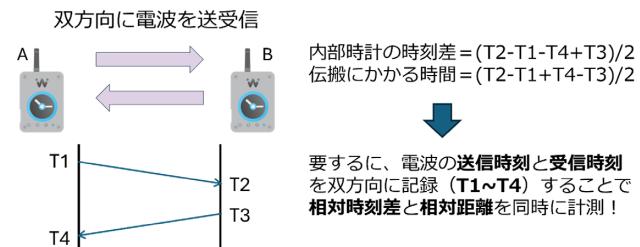


図 3 時空間同期技術 Wi-Wi の動作原理



図 4 時空間同期展示コーナー

2.2 時空間同期技術 Wi-Wi を活用した多視点撮影システムの開発と大阪・関西万博での展示

2.1 で述べた技術の真価は、観測したデータをサイバー空間、いわゆるデジタルツイン上で精緻に統合・分析可能な点にある。複数の時空間同期されたカメラが撮影した映像を合成することで、特定の場所で起きた一瞬の出来事を、様々な角度から正確に捉えることができる。たとえば、建物や木などの障害物に視界が遮られる場所でも、複数のカメラが互いに死角を補い合い、欠けのない映像を作成可能となる。このようにして得られた時空間同期データは、デジタルツイン上で AI と組み合わせることで、私たちの生活をより便利で豊かなものに変えていく可能性を秘めている。

大阪・関西万博では、時空間同期技術 Wi-Wi を活用して、どのように瞬間的な出来事が正確に捉えられるのかを、実際に体験していただき、より多くの方に知っていただくため、ミニ四駆を使った体験型ブースを展示了。ミニ四駆がコースを走る中、ゴールを通過する瞬間に来場者にボタンを押してもらうことで、その前後の車体の動きをデジタルツイン上で再現、タイミングのズレをスコアとして表示するゲーム性を持たせた展示となっている（図 4）。

展示システムとしてはコース全体を俯瞰するカメラに加え、ゴール付近を正面と側面から捉えるカメラの

2 Beyond 5G 向けた NICT の取組～Beyond 5G Ready ショーケースでの展示～

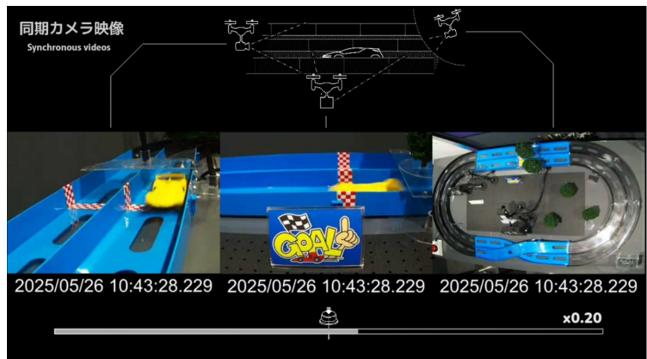


図5 同期カメラ撮影映像



図6 デジタルツイン上でのスコア表示

計3台のカメラを設置した。俯瞰カメラはコース全体の状況を記録できる一方で、樹木によってゴール付近が隠れてしまう（図5）。この死角となるゴール付近は、正面と側面のカメラがしっかりと捉え、複数の視点から多角的に観察できる配置にした。来場者には、一つのカメラでは捉えきれない出来事も、複数のカメラの映像を合成することで「切れ目なく」観察できる様子をご覧いただいた（図6）。

実際、私たちの社会も、単一のセンサだけではその全体像を捉えることは困難である。複数のセンサがそれぞれの役割を果たし、それらを統合することによって初めて現実の出来事を充実に映し出すことができる。

この体験型展示を通して、「時空間同期」という少し難解な概念を、ミニ四駆という身近な題材を通じて直感的に理解していただけたと感じている。大人から子どもまで、技術の面白さを体感できただけでなく、デジタルツインが私たちの未来の生活にどう役立つか、その可能性を考えるきっかけになったのではなかろうか。

この技術は、今後更に多くの分野で活用されていくと考える。ドローンや自動運転車など、様々な移動体に応用されることで、都市のモニタリング、災害時の状況把握、エンターテイメントなど、幅広い分野での新たな価値創造が期待される。

Beyond 5G 時代のテラヘルツ超スポット通信サービス実現に向けた活動

3

1990年代半ばから後半にかけて第2世代と称される移動通信サービスが爆発的に普及はじめ、その後無線通信分野においては増大するデータ転送量に対応するための、変調方式の改良や広帯域化による高速化が進められてきた。しかし、既存のマイクロ波帯と呼ばれる～数GHz帯の周波数帯ではこれ以上の高速化が、原理的にも困難になり、国際的にも新たな周波数帯（ミリ波帯やテラヘルツ帯）の活用に向けた研究開発が進められた。日本においても、総務省が「電波資源の拡大に向けた研究開発」として、未利用の高周波帯の効率的活用や高周波移行技術に関する委託研究を実施し、周波数逼迫の緩和及び無線通信の信頼性向上に寄与する研究を支援するなど、活発な取組が展開されてきた。

このような背景の下、今後の超大容量無線通信を支える有力な周波数帯候補として注目されているのが、60GHzミリ波帯及び300GHzテラヘルツ波帯である。これらは国際的にISMバンドとしての整備が進められており、既存の周波数帯の数十倍に及ぶ広帯域を利用可能とする大きな利点がある。特にテラヘルツ帯（100GHz～10THz）は、広大な周波数資源を有するため、超高速無線通信を実現することが可能である。近年の半導体デバイス技術の進展により、現在では300GHz帯において無線通信システムを構築することが可能となっている。IEEE802.15.3dの標準においては、300GHz帯において利用可能な通信チャネル最大帯域幅69GHzが設定されている。NICTにおいても、これらの周波数帯に対応するデバイスの研究開発と国際標準化への取組を進めてきた。

一方で、60GHzミリ波や300GHzテラヘルツ波といった超高周波帯は伝搬損失が大きく、通信距離を確保するためには高ゲインアンテナが必要となり、放射角が狭まり通信可能エリアが極めて小さくなるという課題がある。高速移動する車両やドローンに対して十分なデータを伝送できるかどうかは、移動体通信に適用する上で大きな制約となる。

このような課題に対し、ソーシャルICTシステム研究室及びテラヘルツ連携研究室の2研究室は連携して「超スポット通信」という新しいユースケース概念を打ち立て、従来の常時接続を前提とする無線サービスに加えて、移動体が狭い通信スポットを通過する超短時間を利用して大容量データを一括伝送する方式について検討を進めてきた。

以下ではテラヘルツの超大容量性を活かすことで、4Kのような高解像度映像であっても非圧縮伝送が可

能となり、極めて低遅延な映像コンテンツの中継伝送が可能であることを示すための「テラヘルツ 4K 非圧縮無線伝送システム」及び通信可能エリアが極めて狭く、移動体が一秒にも満たない短時間で通過してしまうような状況であっても、十分に実用的なデータの収集や配信が可能であることを示すために構築した IEEE802.15.3e/d 準拠大容量データ集配信システムについて述べる。

3.1 300 GHz 帯を用いた 4K 映像のリアルタイム非圧縮無線伝送システム

上述したようなテラヘルツの極めて広い帯域幅を利用可能な条件下では、比較的単純な振幅変調方式 (ASK: Amplitude Shift Keying) を用いても高速な無線通信を実現できる。その一つの応用として、ASK 方式による 300 GHz 帯 4K 映像非圧縮伝送システムを開発した。

図 7 に開発した 4K 映像非圧縮伝送システムの概略を示す。本システムでは、4K カメラから出力された SDI (Serial Digital Interface) 映像信号を 300 GHz 帯の搬送波に重畠して伝送するシステムとなっている。送信機では、サブハーモニックミキサー (SHM) を用いて、300 GHz の搬送波を SDI 映像信号で変調した。生成した 300 GHz 帯信号を増幅器で 1 mW 程度に増幅した後、ゲインが 25 dBi のアンテナを介して自由空間に送出した。受信機では、同じく 25 dBi のゲインを持つアンテナで受信し、低雑音増幅器で増幅された後、ショットキーバリアダイオード (SBD) で検波した。SBD から出力された SDI 映像信号を HDMI 信号に変換してモニターに投影した。

本システムは、非圧縮 4K 映像の SDI 信号を信号処理することなく 300 GHz 帯に周波数変換して伝送しているため、非常に低遅延であることが特徴である。ここで使用しているカメラは 4K (3,980 × 2,160), 30 fps となっており、SDI 映像信号のビットレートは 6 Gbps である。したがって、送信信号は、メインロードだけでも 12 GHz の帯域幅を持つ広帯域の信号と

なっている。この映像信号を WiFi などで利用されている 5 GHz で伝送する場合、帯域幅は数十 MHz 程度であるため、映像を圧縮して伝送する必要がある。そのため、送信側での圧縮と受信側での伸張の処理時間が加わるため、100 ms 以上の遅延が生じる。この伝送遅延は、例えば、機器の遠隔操作などのリアルタイム性が求められる応用では問題になる。一方で、本システムでは、カメラ出力端からモニターまでの伝送遅延が 10 ms 以下となっており、動きの速い機器や精密な制御が必要な機器の遠隔操作においても、遜色なく操作することが可能である。これにより、広い帯域を利用することが可能なテラヘルツ帯無線通信の有用性が示されたものと考えられる。

3.2 IEEE802.15.3 準拠 60 GHz 帯 /300 GHz 帯超スポット通信技術実証用無線システムの開発

先に述べたように、通信可能エリアが極めて狭く、移動体が一秒にも満たない短時間で通過してしまうような状況においては、通信リンクの確立に最大数秒を要するような既存の無線プロトコルを適用することはできない。このような条件下であっても、効率的なデータ転送を可能とする国際無線通信規格に 60 GHz 帯を用いる IEEE 802.15.3e がある。

上記 IEEE802.15.3e は、端末間 (P2P) 通信を前提として、たとえば駅の改札のように利用者が 1 秒にも満たない短時間で通過する場面での通信サービスを想定して規格化されたものであり、MAC (Media Access Control) プロトコル仕様として、2 ms 以下でデータ通信を開始する高速リンク確立機能を定めている。このような超短時間でのリンク確立特性が、後述する車両やドローンなどの移動体による超スポット活用通信に極めて相性のよい特性となっている。

IEEE802.15.3e として国際標準化された技術は、さらに TransferJet コンソーシアムによる活動も経て [4][5]、CMOS 技術によって IEEE802.15.3e 準拠の無線システムが一チップ化された TJX-SoC (Transfer Jet X-System on Chip) [6] 登場に至り、今ではこれを小型の移動端末に搭載することで、様々な実環境下での実証実験が可能となっている。図 8 に NICT が開発した TJX-SoC を活用した IEEE802.15.3e 準拠無線通信モジュールの外観を示す。また、主な仕様を表 1 に示した。

表 1 に記載のとおり、2 ms 以下の高速リンク確立に加えて、チャネルあたり 2.16 GHz の広帯域を活かした最大 6 Gbps の通信を可能となっている。また、Ethernet や USB といった汎用インターフェースを備えており、様々なアプリケーションの検証を容易に行うことができる。さらに大きな特徴として、UFS デバ

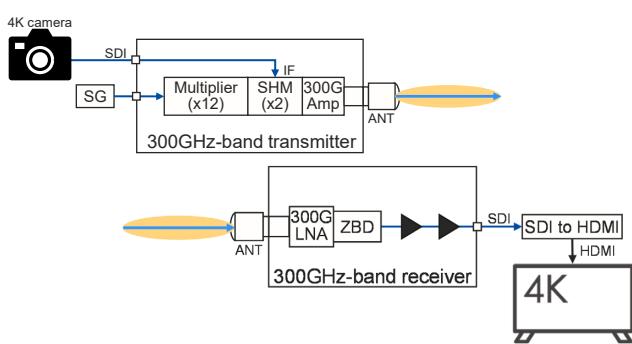


図 7 300 GHz 帯 4K 映像非圧縮伝送システム構成の概略

2 Beyond 5G 向けた NICT の取組～Beyond 5G Ready ショーケースでの展示～



図 8 TJX-SoC を活用した IEEE802.15.3e 準拠無線通信モジュールの外観

表 1 TJX-SoC を活用した IEEE802.15.3e 準拠無線通信モジュールの主な仕様

| パラメータ | 値 |
|------------|-------------------------------|
| 搬送波中心周波数 | 60.48 GHz or 62.64 GHz |
| 帯域幅 | 2.16 GHz |
| データレート | ~ 6 Gbps |
| 伝送距離 | 数 cm ~ 数 100 m (アンテナ依存) |
| 接続確立に要する時間 | < 2 ms |
| 対応規格 | IEEE 802.15.3e, TransferJet X |
| RF 接続 I/F | WG-15 UG-385/U |
| 対応 I/F | USB, 10 Gigabit Ethernet |
| ローカルストレージ | > 200 GB (モジュール上 UFS で実現) |

イスが直接接続されている点が挙げられる。これにより、高スループットで伝送されたデータをそのまま直接記録することができ、無線の高速性を損なうことなく簡便にファイル転送を実現できる。ホストの性能に依存することなく、組み込み機器や車載機器と組み合わせた実験環境でも高いパフォーマンスを発揮できることが利点となっている。

NICT ソーシャル ICT システム研究室では、この TJX-SoC を活用した IEEE802.15.3e 準拠無線通信モジュールを搭載したドローンや車両を用い、移動局同士がすれ違う際に瞬間にデータを交換する、移動局と固定局との間で通過時に大容量データを伝送する通信といった取組を進めてきた。これにより、短時間での超スポットにおける大容量伝送の可能性を検討してきた[7]。

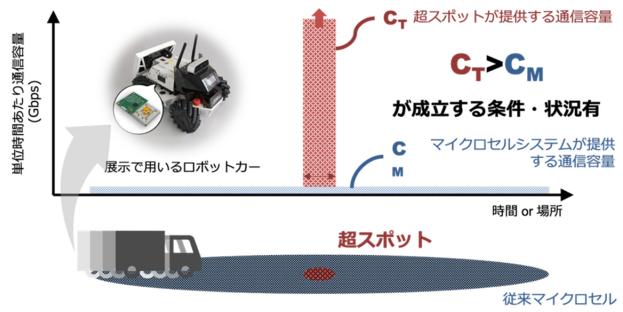


図 9 従来のマイクロセル通信と超スポット通信の通信サービスエリア・通信容量の違いイメージ

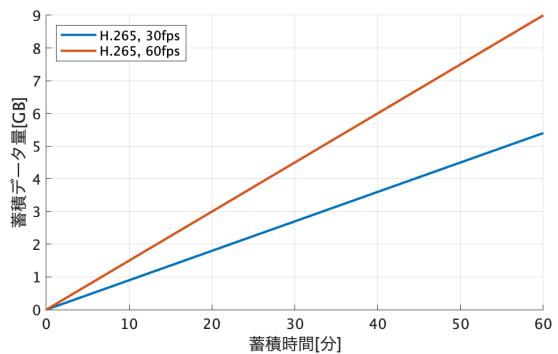


図 10 超スポット通信におけるデータ蓄積時間による蓄積データ量の目安 (4K 映像、フレームレート 30 fps・60 fps、H.265 圧縮を想定)

従来のマイクロセル通信と超スポット通信の特徴の違いを説明する。図 9 に示すように、従来のマイクロセル通信は、設置された基地局の半径数十 m から数百 m 以上の広域をカバーし、そのエリア内で逐次データをアップロードするためリアルタイムで情報をやり取り可能である。一方で、超スポット通信では長時間にわたり蓄積した大容量のデータを 1 メートル未満やせいぜい数メートル程度の極めて狭いサービスエリア内でデータアップロードを試みることから、常時接続性といった意味のリアルタイム性は有していないものの大容量データを極めて短時間でアップロードすること可能となる。

図 10 に、超スポット通信を想定し、フレームレート 30 fps 及び 60 fps の 4K 解像度映像を H.265 で圧縮した場合の、データ蓄積時間による蓄積データ量の目安を示す。図より、数十分蓄積されたデータ量は数 GB のデータ量となり、例えば、ドローンの速さ 1 m/s、超スポットの範囲 1 m とすると、数十 Gbps のデータレートで無線伝送できることが望ましいことがわかる。

さらにソーシャル ICT システム研究室が開発した TJX-SoC ベースの 60 GHz ミリ波帯無線機とテラヘルツ連携研究室が超高周波 ICT 研究室及び共同研究機関と共に開発した CMOS 技術によるテラヘルツ帯送受信ミキサ回路の統合によって、300 GHz 帯 CMOS

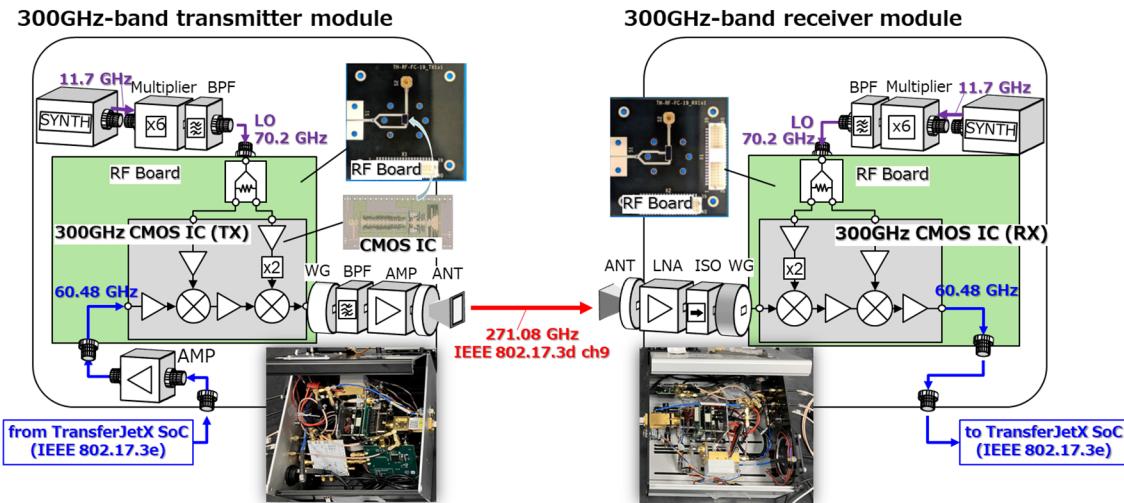


図 11 TJX-SoC を活用した 300 GHz 帯 CMOS 送信・受信システム構成図 [5]

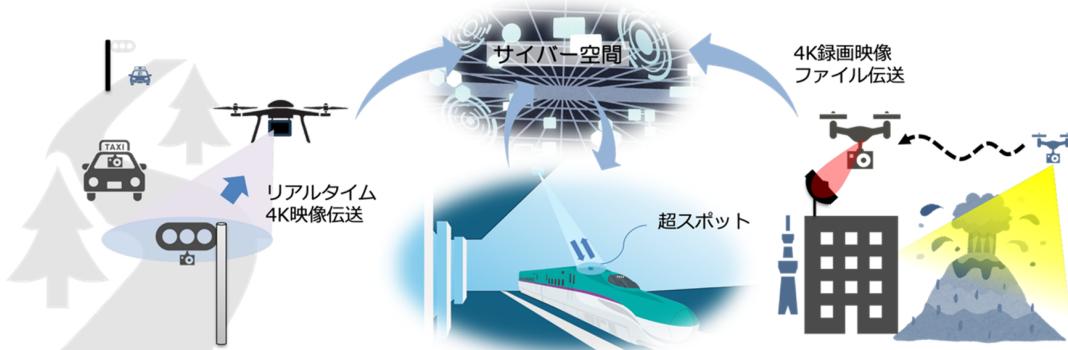


図 12 ミリ波・テラヘルツ超スポット移動通信システムを搭載した自律型モビリティによる多拠点・大容量観測データの集配信イメージ

送信・受信システムの開発に成功した。図 11 にそのシステム構成図を示す。

300 GHz 帯送信機及び受信機は、40 nm 世代の Si CMOS プロセスを用いて開発された CMOS RF デバイスによって構成されている。高度な高周波回路設計技術を駆使することで、60 GHz 帯の信号を 300 GHz 帯へ高効率にアップコンバート及びダウンコンバート可能な RF 回路を実現している [8]。これらのデバイスは WR3 導波管と接続可能な RF 基板上に実装され、局部発振器 (LO) などの周辺コンポーネントと統合された上で、单一の筐体に収容されている。このような構成によって TJX-SoC の信号をアップコンバートすることにより、IEEE802.15.3d/3e に基づいた国際標準の枠組みに沿った形で、300 GHz 帯の移動体通信においてもその有効性を確認可能なシステムの開発に成功した。

3.3 大阪・関西万博におけるミリ波・テラヘルツ超スポット移動通信システム展示

図 12 に、筆者らが描くミリ波・テラヘルツ超スポット

ト移動通信システムを搭載した自律型モビリティの連携による多拠点・大容量観測データの集配信イメージを示す。サイバーフィジカルシステムの一例として、車両・ドローン・列車等によって観測されたフィジカル環境の状態に関わる大容量データがサイバー空間に回収されると同時に、そのデータから得られた新たな推定・予測の結果に基づいてフィジカル空間に何らかのフィードバックを行う、自律型モビリティによる多拠点・大容量観測データの集配信イメージを表している。図中における明示はないが、複数の車・ドローン・列車など高速なモビリティ群の状況や状態変化に応じて、サイバー空間が適切かつ高精度なタイミングで物理空間に何らかの制御フィードバックを行うためには、高精度な時空間同期技術の適用が欠かせないことは前述したとおりである。

さらに、自動運転車両やドローン等の異種モビリティが連携しデータを中継することで、交通量が多い都市部の観測データや通常立ち入りが困難な災害現場の観測データなどであっても、通信ネットワークに対

2 Beyond 5G に向けた NICT の取組～Beyond 5G Ready ショーケースでの展示～



図 13 超スポット通信技術を搭載した自律移動型モビリティの連携によるデータ集配信システムの外観(全体)



図 14 撮影データ再生映像

する負荷を分散しながら効率的に大容量データを回収・配信することができる。

大阪・関西万博の展示では、先に示した開発システムを駆使して、「自動運転車両(ロボットカー)が撮影した大容量データを 60 GHz ミリ波帯で移動中のドローンが回収し、更にドローンが移動して 300 GHz テラヘルツ波でデータを遠隔の地上局に届ける」という自律型モビリティの連携による観測データの回収・配信シナリオを示した。来場者には、60 GHz 帯を用いた大容量撮影データの極短時間での回収の様子、更には 300 GHz テラヘルツ波帯を用いた大容量撮影データの極短時間での配信の様子を実際にご覧いただいた。

図13に、万博における超スポット通信技術を搭載した自律移動型モビリティの連携によるデータ集配信システムの外観を示す。本システムの動作は、以下の4つのフェーズに分けられる。

① 自律型モビリティによる観測データの蓄積

自律走行が可能な、一般的な自動運転車両にも用いられるセンサ群を搭載したロボットカー LIMO [9] を使用して、展示スペース上の自動的な移動と搭載カメラによる走行中の背景(ロボットカー後方のビルや木、信号標識等の模型やジオラマ)を撮影した結果蓄積されたデータを超スポット信用のデータとした。

② ミリ波によるデータの回収

撮影されたデータはロボットカーに搭載した 60 GHz 帯ミリ波無線デバイスを使用し、上部のガントリによって移動するドローンへと伝送を行った。

③ ドローンによるデータの運搬と集約

センシングデータの運搬を行うモビリティとしては実際に実証実験で使用したものと同型のモックドローンを採用した。ガントリを使用しレール場をドローンが移動することで、来場者の目上をドローンが移動してデータを運搬・集約することを可能にした。なおロボットカーやドローンが搭載

する通信機器とガントリが採用する制御システムでは、使用する通信プロトコル(MQTTとMCプロトコル)やデータの形式(JSONとバイナリ・16進数)が異なり、直接通信できない問題があった。このため、通信の橋渡しと変換処理を担う『ゲートウェイ機能』を今回新たに開発・実装することで、この問題を解決した。

④ データの分析と結果の可視化

ドローンが地上局の位置まで移動した後、テラヘルツ受信器搭載の地上局に 300 GHz のテラヘルツ波でデータを伝送した。伝送したデータは地上局にて映像に対しオブジェクト認識などの処理を行い、画面上にその描画を行った(図 14)。同図から、図11で示したロボットカー走行中の背景風景の撮影データを表示されると同時に、道路標識を認識している様子が確認できる。

5 むすび

大阪・関西万博 Beyond 5G ready showcase での出展をきっかけとして、Beyond 5G 社会を構成する技術の一つとして注目されている時空間同期技術の活用方法を提示する実証システムや、大容量テラヘルツを移動体間通信に適用するための実証システムの開発が加速し、それら実証システムの動態展示も大成功かつ大好評のもと幕を閉じることができた。来場者には、こうした先進的な技術の社会実装や実用化が現実のものとなりつつあることを体感していただけたと考える。

特に従来、移動体の通信手段としては適用が難しいとされてきたミリ波・テラヘルツの超スポット通信としての活用方法や効果を提示できたことの意義は大きいと考えられる。今後、鉄道や自動運転車両、物流システム、さらには災害時の情報収集や遠隔監視といった多様な応用に向けて、新しい移動体通信サービスの可能性を示すものとなった。今回の統合展示システムの開発に関わったソーシャル ICT システム研究室、テ

テラヘルツ連携研究室及び時空標準研究室は、今後も内外の研究機関や企業とも連携しながら、更なる社会実装に向けた研究開発を推進する予定である。

最後に大阪・関西万博の動態展示の開発と展示を通じて得られた気づきについて共有しておきたい。展示において重要なのは、来場者に対して「新たな情報」ではなく、「新たな体験」をもたらすことが重要なのだと痛感した。「新たな体験」をもたらすためには、来場者自らが主体的に「これはどうなっているのだろう」という疑問を持ち、動態展示を見て・触って・体験することで「ああ、そういうことが行われているのか」と納得するような作りになっていることが望ましい。その点を踏まえて、本展示では実際に動作する装置で来場者の興味や疑問をかきたて、その上で、できるかぎり実際のユースケースに近い動作フローを再現することでその納得を促すことを狙いとした。本記事の著者となっている極めて多人数で構成された今回の NICT 横断的な研究開発チームの強みが大きく活かされる形で、この狙いは達成され、我々のイメージするユースケースを一般の来場者に伝えられたことはもちろんのこと、来場者には自らが取り組むビジネスで抱えている課題とも結びつけた未来を感じさせることに成功したものと自負している。

【参考文献】

- 1 荘司 洋三, “「今だけ・ここだけ・あなただけ」テラヘルツ超スポット移動通信サービス開発に向けた取組み～超瞬間的な接近機会を活かしたテラヘルツ大容量通信サービスの普及戦略～,” 電波技術協会報 FORN, no.355, pp.30-33, 2023.
- 2 N. Shiga, K. Kido, S. Yasuda, B. Panta, Y. Hanado, S. Kawamura, H. Hanado, K. Takizawa, and M. Inoue, “Demonstration of wireless two-way interferometry (Wi-Wi),” IEICE Communications Express, vol.6, no.2, pp.77-82, 2017.
- 3 S. Yasuda, R. Ichikawa, Y. Hanado, S. Kawamura, H. Hanado, H. Iwai, K. Namba, Y. Okamoto, K. Fukunaga, T. Iguchi, and N. Shiga, “Horizontal Atmospheric Delay Measurement Using Wireless Two-Way Interferometry (Wi-Wi),” Radio Science, vol.54, no.7, pp.572-579, 2019.
- 4 <https://www.transferjet.org/ja/>, Sept. 25, 2025.
- 5 一般社団法人 TransferJet コンソーシアム, “10 Gbps を超える超高速近接無線通信である TransferJet X の規格化が完了,” NewsRelease, May, 2022, <https://newsrelea.se/BV42MO>
- 6 <https://www.sony-semicon.com/ja/products/lsi-ic/transfer-jet.html> Sept. 25, 2025.
- 7 R. Isogai, K. Kondou, L. Shan, T. Matsuda, R. Miura, S. Yasuda, N. Shiga, T. Matsumura, Y. Shoji, “Challenges in Inter-UAV 60-GHz Wireless Communication Utilizing Instantaneous Proximity Opportunities in Flight,” Drones, vol.7, no.9, p.583, Sept. 2023.
- 8 S. Beppu, T. Abe, S. Okii, K. Takano, S. Hara, S. Tanaka, K. Katayama, Y. Sugimoto, S. Kubo, A. Kasamatsu, K. Sakakibara, T. Yoshida, S. Amakawa, and M. Fujishima, “A 258-to-280-GHz 100-Gb/s CMOS Transmitter Element in 40-nm CMOS,” 2024 19th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), pp.150-153, 2024.
- 9 <https://techshare.co.jp/product/agilex/limo/> Aug. 7, 2025.



莊司 洋三 (しょうじ ようぞう)

Beyond5G 研究開発推進
ユニットソーシャル ICT システム研究室
室長
博士 (工学)
無線通信、光通信
【受賞歴】

2010 年 第 21 回電波功績賞 社団法人電波産業会会長賞
2008 年 平成 20 年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞
2007 年 (社) 電子情報通信学会 エレクトロニクスソサイエティ賞



磯谷 亮介 (いそがい りょうすけ)

Beyond5G 研究開発推進ユニット
ソーシャル ICT システム研究室
招聘専門員／協力研究員
博士 (工学)
時刻同期、センサ、センサネットワーク



近藤 啓太郎 (こんどう けいたろう)

Beyond5G 研究開発推進ユニット
ソーシャル ICT システム研究室
主任研究員
無線通信、信号処理、誤り訂正



Nguyen Duc Phuc (ぐえん どうく ふく)

Beyond6G 研究開発推進ユニット
ソーシャル ICT システム研究室
研究員
博士 (工学)
UAV/Vehicular Communications, Optical Wireless Communications, Hardware Accelerators
【受賞歴】
2024 年 Presentation Award, IEEE GCCE'24
2018 年 Best Paper Award, IEEE ATC'18



鈴木 藍礼 (すずき あいれ)

Beyond5G 研究開発推進ユニット
ソーシャル ICT システム研究室
研究技術員

2 Beyond 5G に向けた NICT の取組～Beyond 5G Ready ショーケースでの展示～



福間 恵 (ふくま めぐみ)

Beyond5G 研究開発推進ユニット
ソーシャル ICT システム研究室
研究技術員
デジタル信号処理、無線通信、スペクトル
拡散通信
【受賞歴】
2023 年 電子情報通信学会通信ソサイエティ
学術奨励賞
2018 年 電子情報通信学会通信ソサイエティ
優秀論文賞



安田 哲 (やすだ さとし)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
主任研究技術員
博士 (理学)
時空間同期



丸山 一博 (まるやま かずひろ)

Beyond5G 研究開発推進ユニット
ソーシャル ICT システム研究室
研究技術員



井戸 哲也 (いど てつや)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
室長
博士 (工学)
時空標準



横山 亜生 (よこやま あおい)

Beyond5G 研究開発推進ユニット
ソーシャル ICT システム研究室
研究技術員



諸橋 功 (もろはし いさお)

Beyond5G 研究開発推進ユニット
テラヘルツ研究センター
テラヘルツ連携研究室
研究マネージャー
博士 (工学)
光エレクトロニクス



権吉 ことね (あきよし ことね)

Beyond5G 研究開発推進ユニット
ソーシャル ICT システム研究室



原 紳介 (はら しんすけ)

Beyond5G 研究開発推進ユニット
テラヘルツ研究センター
テラヘルツ連携研究室
主任研究員
博士 (理学)
高周波集積回路、ナノ電子デバイス
【受賞歴】
2018 年 IEICE 論文賞
2017 年 RFIT2017 学会賞受賞
2015 年 RFIT2015 学会賞受賞



後藤 明日香 (ごとう あすか)

Beyond5G 研究開発推進ユニット
ソーシャル ICT システム研究室



関根 徳彦 (せきね のりひこ)

Beyond5G 研究開発推進ユニット
テラヘルツ研究センター
テラヘルツ連携研究室
室長
博士 (工学)
テラヘルツ半導体物性
量子ナノデバイス
テラヘルツ技術



志賀 信泰 (しが のぶやす)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
主任研究員
Ph.D. (Physics)
時空間同期



石津 健太郎 (いしづ けんたろう)

Beyond5G 研究開発推進ユニット
B5G デザインイニシアティブ
イニシアティブ長
博士 (情報科学)