

テラヘルツ帯における 6G 向け超広帯域無線伝送試験装置を開発し、 時速 1000 km の高速移動エミュレーション環境下での基礎伝送に成功

概要

京都大学大学院情報学研究科の原田博司教授、香田優介准教授らの研究グループは、テラヘルツ帯（300 GHz 帯）において 6G 向け超広帯域無線伝送試験装置をソフトウェア無線技術により開発し、時速 1000 km の高速移動エミュレーション環境下において、5G 標準化で定められている通信仕様に準拠しつつ、国内の 5G に割り当てられている最大チャンネル帯域幅（400MHz）の約 20 倍にあたる 7.8 GHz 幅を用いた超広帯域信号伝送（伝送レート：14.6 Gbit/s）に成功しました。今回の成果により、固定通信システムから陸上移動無線、非地上系ネットワークに至るまであらゆるモビリティを想定した利用モデルに対する通信仕様の開発・概念実証が可能となり、6G に向けてテラヘルツ波を用いた超高速無線通信システムに関する研究開発がより一層加速することが期待されます。



図 1：開発した 6G 向けテラヘルツ帯超広帯域伝送試験装置（左：送信機、右：受信機）

1. 背景

商用サービスが開始されている第 5 世代移動通信システム (5G) は、「高速・大容量」「低遅延」「多接続」といった特長を持ち、現在、個人ユーザーに対してのみならず産業や社会基盤を支える重要なインフラとして、さらなる高度化が期待されています。この高度化には、より広範な周波数資源の確保が不可欠であり、現在 5G 向けに割り当てられている Sub-6 GHz 帯¹および 28GHz 帯に代表されるミリ波帯²の有効活用が重要とされています。しかし、5G の普及と技術進展が進むにつれて、これら既存の周波数帯域においても将来的な逼迫が懸念されており、新たな周波数資源の開拓が求められています。

その有力候補としてミリ波の 10 倍の周波数に相当するテラヘルツ波が注目されています (図 2)。テラヘルツ帯では、現在の 5G で利用可能なチャンネル帯域幅の数十倍に及ぶ超広帯域の確保が可能であり、高精細映像の無線伝送、超高速無線バックホール基幹回線など、超高速通信技術の実現に向けて期待が高まっています。



図 2：テラヘルツ波の位置付け

一方、これまでのテラヘルツ帯通信に関する実証実験の多くは、5G に準拠しない変調波の伝送にとどまっておき、5G に準拠した波形を用いた場合であっても、既存の周波数帯で割り当てられている帯域幅を超えない、比較的狭帯域、低伝送レートでの検証に限られていました。第 6 世代移動通信システム (6G) においては、5G の標準方式に準拠しつつ、現在 5G で利用されている 1 チャンネルあたりの最大帯域幅 (400 MHz) を超える GHz オーダという広帯域信号をテラヘルツ帯で伝送し、あらゆる環境下における通信可能性を解明することが重要な研究課題となっています。さらに 6G では、衛星通信等非地上系ネットワーク (NTN: Non-Terrestrial Network) の活用も想定されており、時速 1000km 級の超高速移動への対応が求められています。このような要求に対して、現在、5G で用いられている直交周波数多元接続方式³ (OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access) の各種パラメータを変更し、テラヘルツ帯かつ高速移動環境下でも受信機を安定的に動作させる必要があり、これらを検証可能にする伝送試験装置の開発が急務となっています。

2. 研究成果

5G の標準化団体である 3GPP (3rd Generation Partnership Project) により規格化されている 5G 物理伝送信号フォーマットに従いつつ、国内の 5G チャンネル帯域幅の約 20 倍にあたる超広帯域信号をテラヘルツ帯に乗せて伝送を行う試験装置を、ソフトウェア無線技術を利用して開発しました (基本仕様は表 1 に、伝送装置の構成は図 1 に示す)。具体的には、伝送試験装置には以下の特徴があります。

1. テラヘルツ帯 (300 GHz) で 5G アクセス方式である OFDMA 方式の標準に準拠した物理伝送信号を送信可能
2. OFDMA 方式を構成する最小単位の周波数帯域幅を現状の 120 kHz から、960 kHz にした上で、最大帯域

幅を現状（400 MHz）の約 20 倍（7.8 GHz）に広帯域化し、伝送レート 14.6 Gbit/s で伝送

- 受信機局部発振部の周波数を変更することで、テラヘルツ帯において高速移動する際のキャリア周波数オフセット⁴をエミュレーション可能（移動速度は設定周波数オフセットを生じうる最大ドップラー周波数として換算）
- 高速移動環境で問題となるキャリア周波数オフセットを自動で推定・補正し、安定的に送信信号を同期させ受信できる信号処理方式を新たに開発し、超広帯域ソフトウェア無線機に搭載

表 1：開発したテラヘルツ帯超広帯域無線伝送装置の仕様

項目	値
周波数	300.24 GHz
帯域幅	7.8336 GHz
通信方式	5G NR OFDM
送信電力	0 dBm
OFDM サブキャリア間隔	960 kHz
物理リソースブロック数	680
MCS	1
伝送レート	14.6 Gbit/s
変調方式	QPSK
誤り訂正符号	LDPC
サンプリングレート	8 GHz

この装置を用いて時速 1000 km 程度までの高速移動を想定したエミュレーションを実行し、研究室内で伝送特性試験（図 3）を行い、ブロック誤り率（BLER：Block Error Rate）を測定評価しました。評価においては技術計算言語 MATLAB を用いて記録信号に雑音を追加した AWGN（Additive White Gaussian Noise）チャンネルで実施し、SNR は-0.4 dB と設定しました。また、適切に同期ができない場合は、ブロック誤りとして処理しました。図 4 に示している通り、最大時速 1000 km 程度まで速度を変化させた際、マイクロ波など低周波数帯に向けた従来開発手法は時速 700 km-1000 km 付近で BLER が所要値である 10%を達成できない一方で、今回新たに開発した信号処理手法を用いることで、検証下すべての速度環境において BLER の所要値以下を達成しました。このことは、キャリア周波数オフセットへの対応という観点では、移動速度が時速 1000 km 相当の環境下においても安定した信号伝送が行うことができることを示唆しています。

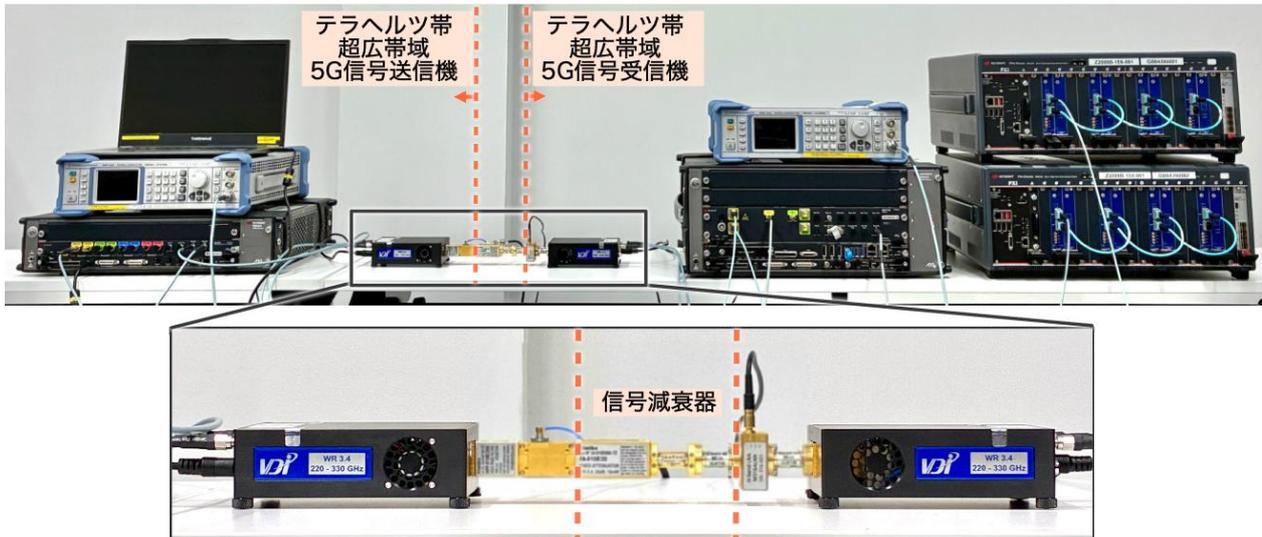


図3：開発したテラヘルツ帯超広帯域伝送試験装置の評価系

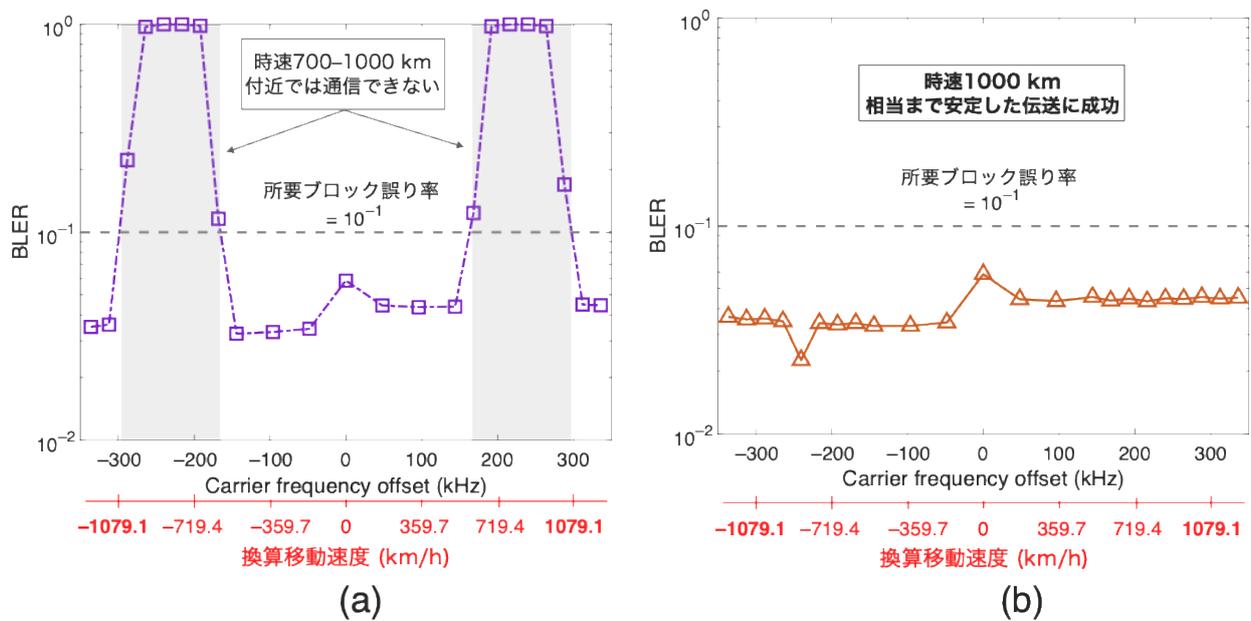


図4：BLER 特性 ((a) 従来開発の信号処理方式、(b) 今回開発の信号処理方式)

3. 波及効果、今後の予定

今回開発した伝送試験装置を用いた検証から、現状の5Gチャンネル帯域幅の10倍以上を占める超広帯域5G信号伝送をテラヘルツ帯で行う際、キャリア周波数オフセットを考慮して受信機を精巧に構築すれば、時速1000 kmの高速移動エミュレーション環境においても安定した信号伝送が可能になることが示されました。今回の成果により、固定通信システムから陸上移動無線、NTNに至るまであらゆるモビリティを想定したテラヘルツ帯超高速無線伝送方式の開発・概念実証が可能となり、テラヘルツ帯無線通信システムに関する6Gに向けた取り組みがより一層加速することが期待されます。この研究成果に関しては、2026年3月4~6日開催の電子情報通信学会移動通信ワークショップ（東京理科大学で開催予定）において発表予定です。

4. 研究プロジェクトについて

本研究の一部は国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究（JPJ010017C07501）、および、委託研究（JPJ012368C04201）の一環として実施されたものです。

<用語解説>

1. sub 6 GHz 帯：

一般的には、総務省より第 5 世代移動通信システムに向けて、携帯電話事業者、および、その他の事業者による自営目的のために割り当てられた、3.7 GHz および 4.5 GHz 付近の周波数帯域のことを指す。

2. ミリ波帯：

30 GHz 付近から 300 GHz までの周波数帯域全般を指す。総務省より第 5 世代移動通信システム向けに割り当てられた 28 GHz 付近の周波数帯域もミリ波帯と呼ばれることが多く、一般的にはその下限として 28 GHz を含む。

3. 直交周波数多元接続方式（OFDMA：Orthogonal Frequency Division Multiple Access）

データを直交する周波数サブキャリアに分割して並列に伝送する直交周波数分割多重方式（Orthogonal Frequency Division Multiplexing：OFDM）を拡張し、複数の無線局がそれぞれ異なるサブキャリアを用いることで、互いに混信することなく同時に通信を行うことを可能にする技術。第 4 世代移動通信システム（4G）では下り通信において採用されており、現在では第 5 世代移動通信システム（5G）において、下り通信および上り通信の両方に採用されている。

4. キャリア周波数オフセット

無線通信において送信機と受信機が用いる搬送波周波数の差分を指す。特に、送信機と受信機の周波数を合わせてデータの復調を行う同期検波において問題となる。キャリア周波数オフセットは、送信機と受信機の局部発振器の精度差や端末の移動に伴うドップラー効果により生じる。