

リニアセルを用いた高速無線通信および高精度レーダーに関する研究

研究代表者 川西 哲也
(基幹理工学部 電子物理システム学科 教授)

1. 研究課題

直線上に並べたミリ波・テラヘルツ波送受信ユニットを光ファイバーで接続したシステムであるリニアセルを用いた高速無線通信と高精度レーダーの性能向上に関する研究を行う。リニアセルシステムの基礎概念は研究代表者らが中心となって提案したものであり、空港滑走路や鉄道線路上の障害物を検知するためのレーダーシステムや、インフラ向け高速通信システムへの実用展開を、公的研究機関、民間企業などと連携して進めている。

特に近年は、6G/Beyond 5G時代の大容量・高信頼アクセスネットワークに向けて、光ファイバー伝送とミリ波・テラヘルツ波無線伝送を統合する光無線融合システムの重要性が高まっている。大学側としては、電波伝搬、屋外無線伝送、光ファイバー伝送、高精度光変調および測定技術に注力し、光無線融合システム研究を新たな学術分野として発展させることを目指している。また、当該分野の学生指導を通して、国際的に広がり期待される分野で活躍できる人材の輩出につなげたいと考えている。

2. 主な研究成果

今年度は、リニアセル技術および光無線融合システムの実用展開に向けて、300 GHz 帯屋外固定無線伝送の長期評価を中心に研究を進めた。昨年度までに構築した 300 GHz 帯屋外無線ユニットを用い、西早稲田キャンパス内の屋外環境において、受信電力、通信状態、降水量、風速、温度などの環境パラメータを連続的に取得し、実環境における 300 GHz 帯リンクの安定性を評価した。テラヘルツ帯固定無線は、広い周波数帯域を利用できることから、光ファイバーを補完する短距離大容量伝送手段として期待されている。一方で、周波数が高く波長が短いため、降雨による吸収・散乱、アンテナの方向ずれ、屋外機器の設置条件などが通信品質に与える影響を詳細に把握する必要がある。特に 300 GHz 帯では、狭ビームアンテナを用いることで高いアンテナ利得を得ることができるが、その反面、実環境におけるわずかな変動がリンク品質に影響する可能性がある。そのため、実際の屋外環境における長期測定データの取得は、テラヘルツ帯無線システムの設計指針を確立するうえで重要である。

長期測定の結果、晴天時には安定した通信が維持される一方、降雨時には受信電力の低下や短時間変動が観測された。得られた測定結果を ITU-R 勧告に基づく降雨減衰モデルと比較したところ、降雨時の受信電力低下について基本的な傾向を確認することができた。一方で、強い降雨や風を伴う条件では、降水量のみから予測される減衰量とは異なる変動が見られる場合もあった。これらの結果は、300 GHz 帯屋外固定無線リンクの信頼性評価において、平均的な降雨減衰だけでなく、実際の気象条件下で発生する短時間変動を考慮する必要があることを示している。

さらに、光無線融合システムの基盤技術として、マルチモードファイバ内の光伝送に関する研究も進めた。リニアセルシステムや将来の光無線融合アクセスでは、多数のアンテナユニットや無線装置を光ファイバーで接続する必要がある。マルチモードファイバでは複数の伝搬モードが存在するため、伝送される信号の波形、遅延特性、周波数応答が無線信号伝送に影響を与える可能性がある。今年度は、マ

ルチモードファイバ内の伝送特性変動に着目し、長時間測定を行った。また、リアルタイム広帯域信号処理を可能とする送受信機を用いた動的な等化を実証した。

加えて、高精度光変調に関する研究も実施した。これまで無視されてきた電極間のクロストークの測定方法を提案し、実際の光変調器に対して適用し、その有効性を確認した。光無線融合システムでは、無線信号の生成、周波数変換、伝送、測定において、光信号の振幅・位相を精密に制御する技術が重要となる。高精度光変調技術は、広帯域無線信号の発生や評価だけでなく、テラヘルツ帯無線伝送装置の校正、光ファイバー経由での信号分配、リモートアンテナユニットの高精度制御にも応用できる。

以上の成果により、300 GHz 帯屋外固定無線伝送の実環境特性に関する知見を蓄積するとともに、光ファイバー伝送、高精度光変調、テラヘルツ波無線伝送を統合する光無線融合システムの基盤技術を発展させることができた。これらの成果は、将来の 6G/Beyond 5G ネットワークにおける短距離大容量固定無線リンク、モバイルフロントホール・バックホール、インフラ向け高信頼通信システムの実現に向けた重要な基礎となる。

3. 共同研究者

理工学術院総合研究所 招聘研究員 稲垣恵三
理工学術院総合研究所 嘱託研究員 実野邦久

4. 研究業績

4.1 学術論文

Zu-Kai Weng, Yuki Yoshida, Toshimasa Umezawa, Michikazu Hattori, Yukihiko Suga, Atsushi Matsumoto, Atsushi Kanno, Naokatsu Yamamoto, Tetsuya Kawanishi, and Kouichi Akahane, "High-mobility 40-Gbps free-space optical link by a three-stage high-speed beam stabilizer and 2-D photodetector array based diversity reception," *Optics Express*, vol. 33, no. 8, pp. 16820-16832 (2025).

Haruka Matsunaga, Yoji Orihara, and Tetsuya Kawanishi, "Precise broadband characterization of optoelectronic devices using optical two-tone signal-based second- and third-order nonlinearity measurements," *IEICE Electronics Express*, vol. 22, no. 10, pp. 20250193-20250193 (2025).

Qingchuan Huang, Hugo S. C. Freire, and Tetsuya Kawanishi, "High-Precision Characterization and Bias Control of Parallel Mach-Zehnder Modulators Using Optical Spectrum Analysis," *IEEE Access* (2025).

4.2 総説・著書

特になし

4.3 招待講演

Tetsuya Kawanishi, "Space Division Multiplexed Fixed THz Communication System," 2025 25th Anniversary International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), pp. 1-4 (2025).

Tetsuya Kawanishi, "Experimental Demonstrations of Long-Range Wireless Communication Using the 100 GHz Band," 2025 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT), pp. 205-207 (2025).

4.4 受賞・表彰

特になし

4.5 学会および社会的活動

Qingchuan Huang and Tetsuya Kawanishi, "Instantaneous Frequency Measurement using Single Sideband Modulation of Mach-Zehnder Modulators," 2025 AP-RASC, Sydney, Australia.

Riki Nishidono, "Impact of Antenna Gain on Measurement of THz Scattering from Random Rough Surfaces," 2025 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA), Antibes, France.

Arata Ogaki, "300 GHz Radio Unit with Temperature Controller for Long-term Rain Attenuation Measurement," 2025 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA), Antibes, France.

恩田, 「テラヘルツ帯空間多重システムの実現に向けた人工降雨環境下での 300 GHz 帯電波散乱基本特性測定」, 2025 MWPTHZ, 北海道.

今村岳斗, 「ミリ波帯およびテラヘルツ帯の OFDM 信号による高速振動の同時測定」, 2025 MWPTHZ, 北海道.

Arata Ogaki, "Impact of Submillimeter Misalignment on 300 GHz System Performance due to Two-wave Ground-reflection Interference," 2025 PIERS, Chiba, Japan.

中澤広太, "Measurement of 300 GHz Radiation Patterns under Simulated and Natural Rainfall," 2025 PIERS, Chiba, Japan.

恩田, "Measurement of 300 GHz Rain Scattering for Crosstalk Analysis in Terahertz Spatial Multiplexing Systems," 2025 PIERS, Chiba, Japan.

中澤広太, 「E 帯フレキシブル導波管の曲げ・ねじれに対する振幅位相特性測定」, 2026 MWPTHZ, 大阪.

Shun Harada, "Photon-Trapping Type Photodetector for High-Sensitivity and High-Speed Communication," OECC/PSC 2025, Sapporo, Japan.

Yoshihisa Ohnuki, "Integrated Microlens Array on 6×6 Arrayed Photodetector with Photomask Alignment-less Process," OECC/PSC 2025, Sapporo, Japan.

Keita Kato, "Time-Resolved Measurement of Multi-Mode Fiber Frequency Response Using OFDM Signals," OECC/PSC 2025, Sapporo, Japan.

Chen Zheng, "Tunable Laser Linewidth via Phase Wrapping in Optical Phase Random Walk Modulation," OECC/PSC 2025, Sapporo, Japan.

Shumpei Kinoshita and Qingchuan Huang, "Investigation of Real-time Multiplication using an Optical Multilevel Coherent Modulator," OECC/PSC 2025, Sapporo, Japan.

Shun Harada, 「S-C-L バンドにおける高感度フォトトラップ型 PD」, 電子情報通信学会総合大会, 九州産業大学, 2026 年 3 月.

Riku Yoshino, "Analysis of Asymmetric Scattering Distribution Under 45-Degree Polarized Incidence for Terahertz Waves," 2025 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS-Fall), Chiba, Japan.

Riku Yoshino, "Measurement Deviation in Terahertz Wave Scattering Using Stochastic Function Approach," 2025 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA), Antibes, France.

5. 研究活動の課題と展望

今年度の研究により、300 GHz 帯屋外固定無線伝送において、降雨時の受信電力低下や短時間変動を実環境で評価するための基礎データを取得することができた。一方で、強い降雨を伴う条件では、既存の降雨減衰モデルのみでは十分に説明できない変動が見られる場合があり、300 GHz 帯伝搬の実環境評価には、さらに長期的かつ多面的なデータ蓄積が必要である。今後は、降雨量、風速、温度などの気象パラメータと通信品質の関係をより詳細に解析し、テラヘルツ帯屋外固定無線リンクの信頼性評価モデルの高度化を進める。また、マルチモードファイバ伝送や高精度光変調に関する研究を継続し、光ファイバーとテラヘルツ波無線を一体的に扱う光無線融合アクセスシステムの設計指針の確立を目指す。これにより、将来の社会インフラを支える高信頼・大容量通信システムの実現に貢献したい。