

# 超高精度テラヘルツスペクトル制御技術の開発 (165003010)

Development of the highly precise Terahertz Spectrum Control Technology

## 研究代表者

及川 陽一 シンクランド株式会社  
Oikawa Yoichi Think-Lands Co., Ltd.

## 研究分担者

志賀代康<sup>†</sup> 川西哲也<sup>††</sup> 梅沢俊匡<sup>†††</sup> 菅野敦史<sup>†††</sup> 木内等<sup>††††</sup> 戸田裕之<sup>†††††</sup>  
Noriyashu Shiga<sup>†</sup> Tetsuya Kawanishi<sup>††</sup> Toshimasa Umezawa<sup>†††</sup> Atsushi Kanno<sup>††††</sup>  
Hitoshi Kiuchi<sup>††††</sup> Hiroyuki Toda<sup>†††††</sup>  
<sup>†</sup>シンクランド <sup>††</sup>早稲田大学 <sup>†††</sup>情報通信研究機構  
<sup>††††</sup>国立天文台 <sup>†††††</sup>同志社大学  
<sup>†</sup>Think-Lands Co., Ltd <sup>††</sup>Waseda University  
<sup>†††</sup>National Institute of Information and Communications Technology  
<sup>††††</sup>National Astronomical Observatory of Japan <sup>†††††</sup>Doshisha University

研究期間 平成 28 年度～平成 30 年度

## 概要

テラヘルツ帯の信号発生・検出・評価と科学応用、産業応用を目的として、光の多値変調、光波制御の高精度化、ミリ波帯・テラヘルツ波信号による光変調技術などをベースにしたテラヘルツ帯での高精度・高安定な信号の発生を実現する技術を開発した。電気信号を入力として高精度な光変調を実現する外部変調技術に基づくものであり、安定性と制御性の高さが特徴である。長時間安定動作のためのバイアス制御技術、安定した光位相制御のための光集積デバイス、光電気変換素子での変換効率向上に適した光信号発生などの要素技術研究の開発も並行して実施した。

### 1. まえがき

光の多値変調、光波制御の高精度化、ミリ波帯・テラヘルツ波信号による光変調技術などをベースにテラヘルツ帯の信号発生・検出・評価技術と科学応用、産業応用のためのシステムを開発することを目的とする。

これまでの単パルス光源や光位相同期などの高度な光源制御に技術の重点があったテラヘルツ信号発生とは異なり、電気信号を入力として高精度な光変調を実現する外部変調技術に基づく、テラヘルツ帯での高精度・高安定な信号の発生を実現する技術を開発する。

### 2. 研究開発内容及び成果

#### (1) 外部変調によるテラヘルツ帯光変調技術

LN 外部変調器における 4 通倍モードを活用して、新規バイアス制御アルゴリズムを考案しその安定性能を確認した。これにより、TWO-TONE 信号光は $\pm 0.2$  dB の制御安定性が得られ、36 時間以上の自動安定制御系の動作を確認した。一方、キャリア抑圧比は 50 dB 以上を確保できた。(図 1 参照)

広帯域化を達成し、計測技術への応用を図るとともに、4 方式(光 2 トーン信号、平坦光周波数コム、広帯域光周波数コム、高調波高効率)の包括的な比較を行った。その成果を著名な国際会議 ECOC にて招待講演として発表し、さらに、詳細の内容を取りまとめたものが著名学術誌 IEEE/OSA JLT に採録された。

光単側波帯変調ループ、および単一変調器ループによる広帯域光周波数コム発生について検討を行った。単一変調器ループによる光周波数コム発生では、図 1-3-1 に示すように、変調器の駆動電圧に 2 次高調波を重畳することで、駆動電圧の許容範囲が大幅に拡大することを明らかにした。10GHz 間隔の光コム発生実験を行ったが、線幅の狭いレーザーではループ長安定化を行なう必要がある事

が分かった。

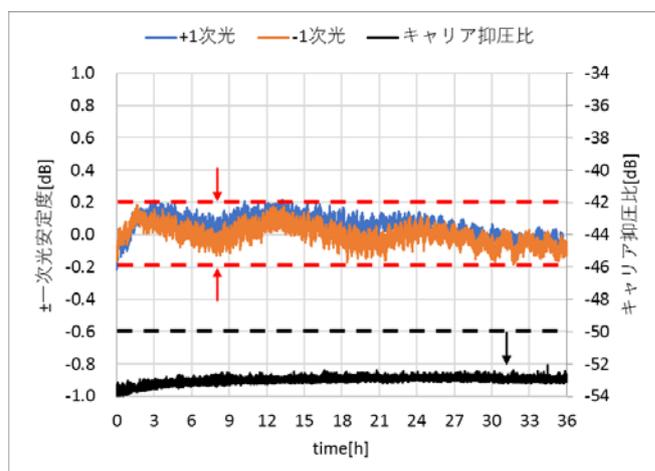


図 1. 制御安定性

#### (2) 光=テラヘルツ変換デバイス

単一走行キャリアフォトダイオード (UTC-PD) 構造を採用し、その特性評価ならびに特性向上設計を実施することにより、目標数値を大幅に超える 200 GHz 帯での応答を得ることに成功した。具体的には、動作バイアス電圧低減のために InP キャリアコレクタ層の低濃度化、および、キャリアコレクタ層の厚膜化による CR 時定数の低減をはかり、カットオフ周波数の高周波化を目指した。図 2 に試作した UTC-PD の光=テラヘルツ変換特性を示す。入力光が誘起する光電流値とテラヘルツ出力が 100GHz 時と 210GHz 時に変わらず線形特性を保ち、210GHz まで線形応答が得られるデバイス開発に成功した。

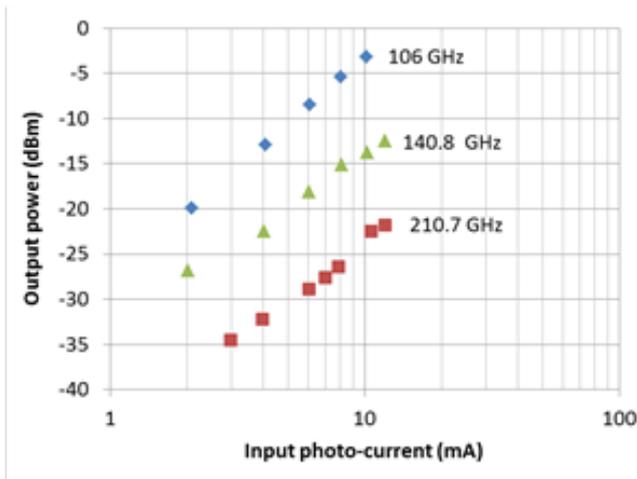


図 2. UTC-PD の光＝テラヘルツ変換特性

### (3) テラヘルツ帯信号評価技術

テラヘルツ帯信号に対する長期安定性測定技術として、アラン分散計測において 2000 秒以上の長期成分においても  $1 \times 10^{-17}$  以上の位相安定度測定能力を達成でき、最終目標を達成した。2 光波抽出技術やマイクロ波フォトニクス信号どうしの周波数比較技術を開発し、650 GHz までのマイクロ波フォトニクス信号どうしの直接位相比较実験を行い周波数に依存しないユニバーサルな方式を確立できた。

### (4) テラヘルツ帯基準信号発生技術

光周波数コム信号からテラヘルツ発生に向けた 2 光波の抽出を行い光電気変換する技術の開発を行い、25 GHz 間隔の光コム信号の任意の 2 波の抽出が可能になった。また、マッハツェンダ型光変調器の周波数分解能特性と光コム発生器の広帯域性能の合成手法を用いた光シンセサイザを製作し、低周波から THz までを 1 台でカバーする性能を持ち、1Hz 以下の高周波数分解能を有したシンセサイザとしてのテラヘルツ帯基準信号発生技術を実現することができた。

### (5) 光＝テラヘルツ直通通信技術

ベースバンド変調および光トゥートン発生技術を組み合わせることで、単偏波 64Gbit/s (ラインレート) 300GHz 空間伝送を実証。単側波帯光変調技術の適用による高マイクロ波帯信号のファイバ伝送技術を開発することで、周波数帯域幅 10 GHz で単偏波スループット 45 Gbit/s の高周波数利用効率光＝テラヘルツ直通通信を実現した。信号送信側で逆演算をすることにより、この周波数特性をデジタル的に平坦化する予補償を行い、復調コンスタレーションもシンボル分離が明確となった。本検証では単偏波信号のみ伝送しているため、偏波多重化を行うことで伝送容量を 2 倍に増強することも容易である。つまり、100 Gbit/s 級光＝テラヘルツ直通伝送が本技術を用いれば実現できることを意味している。

## 3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取組

光によるテラヘルツ信号発生技術を Beyond 5G/6G など必要とされる超高速固定無線バックホール/フロントホールへの適用を検討する。また、今回得られた包括的な THz 通信システムの評価指標を広く適用し、有線と無線が融合した次世代ネットワークの設計ツールとしての展開を目指す。

## 4. むすび

「ていねいに」テラヘルツ帯を利用していくための、信号発生・検出・評価技術と、科学応用、産業応用のためのシステム開発が、本研究のねらいであり、5つの機関が連携し、個別に開発目標を掲げて推進してきた。開発期間完了時には、全ての目標が達成されており、優れた成果をあげることができた。

技術面での特徴は、外部変調に立脚するという点である。この外部変調は電気信号処理と光技術を結びつけるものであり、これまで高度に発展してきた無線システム向けに開発された信号処理技術との親和性が高く、実用化への障壁が低いといえる。量産無線システムにおいてベースバンド、中間周波数帯の信号処理チップの開発が非常に大きな投資を要するが、本研究課題の成果実用化にはこれまでに開発されてきた信号処理技術を極力転用することが可能である。これにより、新規システム導入コスト削減が期待される。

### 【誌上发表リスト】

- [1]Tetsuya Kawanishi, "THz and Photonic Seamless Communications", Lightwave Technology Journal of, vol. 37, no. 7, pp. 1671-1679, 2019. (平成 31 年 4 月 1 日)
- [2]Toshimasa Umezawa, Kenichi Kashima, Atsushi Kanno, Atsushi Matsumoto, Kouichi Akahane, Naokatsu Yamamoto, and Tetsuya Kawanishi, "100-GHz Fiber-Fed Optical-to-Radio Converter for Radio and Power-Over-Fiber Transmission", IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 23, NO. 3, 3800508 (平成 29 年 5 月 1 日)
- [3]Hitoshi Kiuchi, Tetsuya Kawanishi, Atsushi Kanno, "Wide frequency range optical synthesizer with high-frequency resolution," IEEE Photonic Technology Letters Vol.29, No.1, pp.78-81 (2017 年 1 月)

### 【申請特許リスト】

- [1]特願 2017-113839 号 木内等、菅野敦史、川西哲也、2 光波の位相調整装置、日本、2017 年 6 月 8 日
- [2]Hitoshi Kiuchi, "Optical synthesizer", 米国、2016 年 10 月 18 日
- [3]Hitoshi Kiuchi, "Frequency comparison and phase synchronization in optical signals", 米国、2016 年 10 月 18 日

### 【登録特許リスト】

- [1]木内等、光シンセサイザ、米国、2016 年 10 月 18 日申請、2018 年 4 月 3 日登録、米国特許第 9935717 号

### 【国際標準提案リスト】

- [1]IEC TC103 WG6, "Proposal of Preliminary Work Item on IEC62803-2 Edition 1.0 Transmitting equipment for radiocommunication - Frequency response of optical-to-electric conversion device in high-frequency radio over fibre systems - Part 2 Measurement method of common-mode rejection ratio of optical coherent receiver," 提案年月日: 2016 年 10 月 7 日