

THz 波の波動性を活用した THz 帯領域直接処理型波形シンセサイザ

代表研究者

瀧口 浩一

立命館大学 理工学部 電気電子工学科 教授

1 研究の目的

ミリ波と光波の境界領域にあるテラヘルツ帯 (THz 帯、0.1~10 THz) は、従来の無線通信用の周波数帯 (マイクロ波、ミリ波) より格段に高周波、広帯域のため、次世代の 6G (第 6 世代移動通信システム) 以降の無線通信で期待される 100 Gbit/s 級の通信を実現可能な周波数帯として注目されている[1]。

本研究では、処理速度に限界があり消費電力が大きい現状の THz 帯通信信号の電気領域での処理から発想、視点を変え、THz 波の波動性 (干渉・回折特性) を用いた THz 帯領域直接での、高速実時間・低消費電力の信号処理の実現を目的とする。具体的には、受動素子のみで THz 帯高速信号の周波数フィルタリング、波形整形・制御、暗号・復号化などが可能な THz 帯領域直接処理型フィルタの実現を目標とした。研究の概要を図 1 に示す。

本研究の実施によって、THz 帯領域直接での信号処理手法を開拓し、超高速 THz 帯通信の実現、そのセキュリティ向上などに寄与できる。光ファイバの敷設が困難な場所・状況での柔軟な短距離・超高速無線通信の実現、延いては地域間デジタル・ディバイド (情報格差) 解消などに貢献し、学術、社会面で意義は大きい。

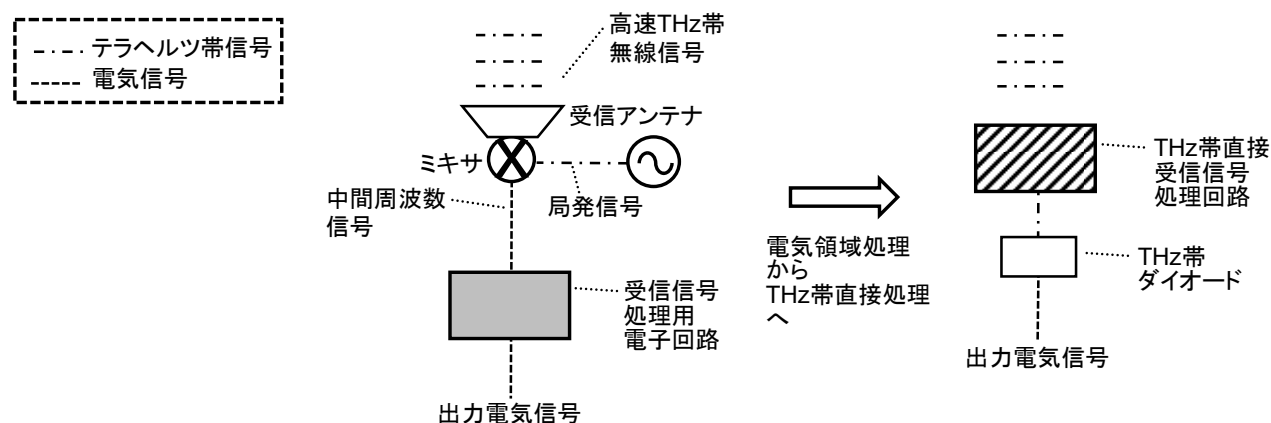


図 1 THz 帯領域直接信号処理の概要

2 研究内容

2-1 研究方法

研究期間内に、THz 帯領域直接処理型フィルタに関して、(1) 300 GHz 帯での性能把握、(2) 構築、周波数特性の評価、機能実証、(3) 性能・知見・課題のまとめを行った。また、成果の外部発表を行った。(2)のなかで、機能実証実験については現在も継続中である。

項目(1) 300 GHz 帯での性能把握に関しては、現在入手することができる THz 帯受動素子の特性から、原理的には 300 GHz 帯において、分解能数 GHz でチャネル数数 10 程度が可能であることを明らかにした。しかしながら、使用予定の THz 波発生源 (単一走行キャリアフォトダイオード、Uni-travelling Carrier Photodiode: UTC-PD) [2]の出力は~100 μ W である。この出力が実現チャネル数を制限するため、本研究期間内では、分解能数 GHz、チャネル数 4 のフィルタの構築を行い、原理検証を目指すこととした。

項目(2)のフィルタの構築については、項目(1)の検討結果を基に、必要な THz 波バルク部品を購入し、フィルタを構築し、周波数特性の評価、および機能検証実験を行った。

2-1 研究結果

(1) 実験系の構成

具体的に、以下の研究内容を実施した。

今後、THz 帯において 100 Gbit/s 級の超高速通信を実現するためには、複数搬送波信号の高周波数利用効率化も必要である[3]-[6]。今回、THz 波用のフーリエ変換型マイケルソン干渉計 (Michelson interferometer: MI) 型周波数フィルタを構成し、300 GHz 帯可変容量高周波数利用効率周波数分割多重 (Frequency division multiplexing: FDM) 信号 ($2 \times 4 \text{ Gbit/s} \sim 4 \times 8 \text{ Gbit/s}$) を 300 GHz 帯で柔軟に直接分離受信する検討を行った。光通信との接続用・光通信の代替用無線信号のチャネル、複数チャネルを束ねた無線チャネルの分離などの高シンボルレート信号の分離を主な対象とし、細かな単位のチャネル分離や精度が必要な処理に関しては、従来と同様に電気領域での処理を想定した。フーリエ変換型フィルタとしているのは、次段階の研究の目標として、周波数利用効率 1 symbol/s/Hz の直交周波数分割多重 (Orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 信号のサブキャリアチャネルの分離に、このフィルタを適用することを考えているためである。

図 2 に、THz 波用のバルク素子 (ビームスプリッタ、ミラー) を用いた MI 型周波数フィルタの構成を示す。アーム長差 $\Delta L/2$ (ΔL : 12 mm) の MI1 [FSR (Free spectral range): 25 GHz] の出力の一方に、アーム長

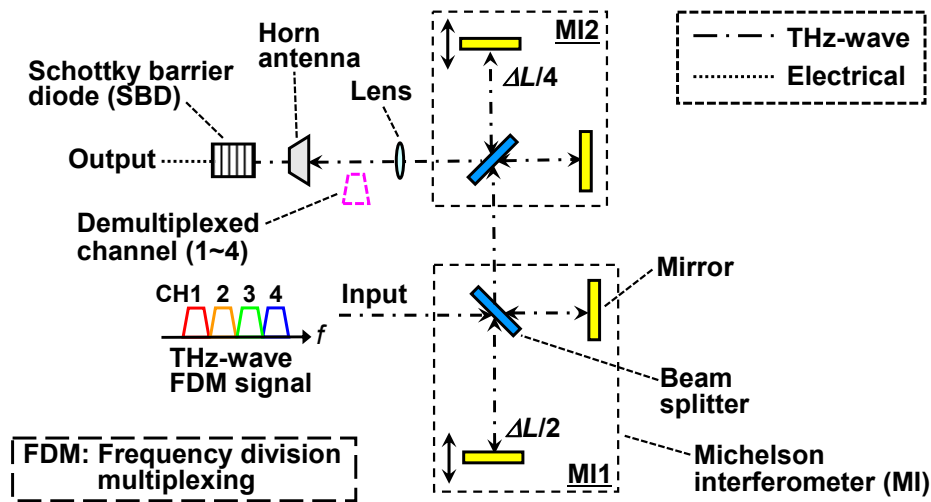


図 2 THz 波用マイケルソン干渉計型フーリエ変換フィルタの構成

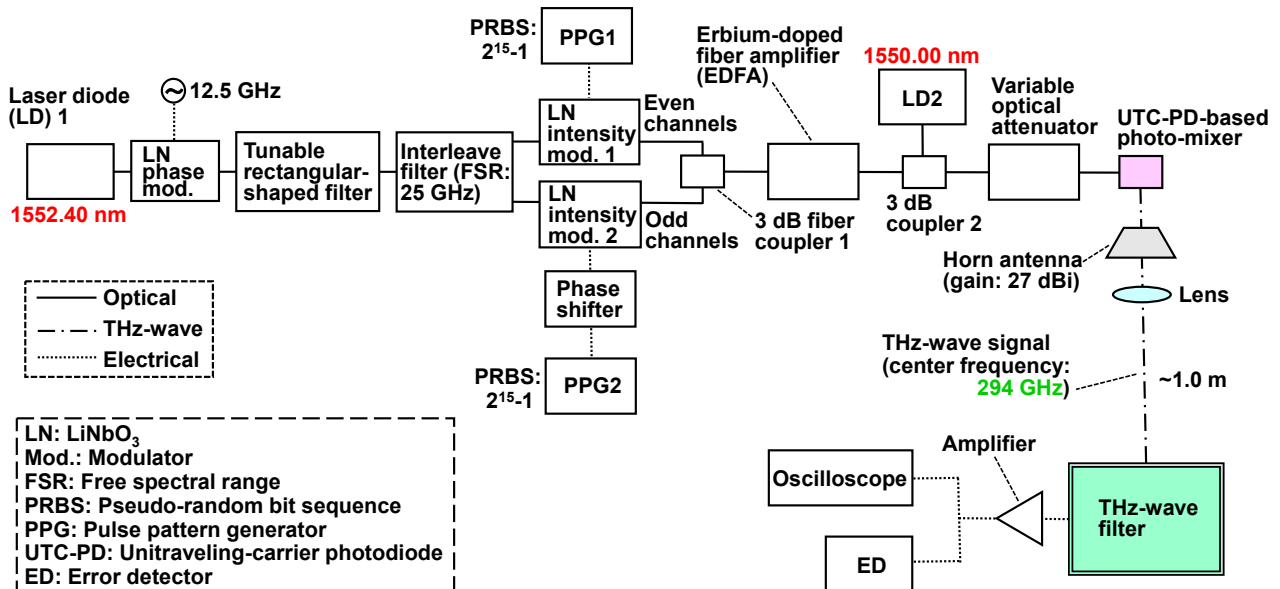


図 3 300 GHz 帯可変容量 FDM 信号の分離実験系

差 $\Delta L/4$ のMI2 (FSR : 50 GHz) を縦続接続している。12.5 GHz 間隔の 4 x 12.5 Gbaud の OFDM 信号の分離用であるが、高密度に配置された FDM チャンネル信号の分離にも適用できる[7]。今回は簡単のため 1 出力構成とし、干渉計の位相を変化させて全チャンネルの分離を行った。図 3 に全体の実験系を示す。各チャンネルには強度変調信号を用い、ショットキーバリアダイオードで包絡線検波受信を行った。各チャンネルのシンボルを同期させた 300 GHz 帯可変容量 FDM 信号 [2 x 4 Gbit/s ~ 4 x 8 Gbit/s (12.5 GHz 間隔)、PRBS (Pseudo-random bit sequence) : $2^{15}-1$ 、最大強度: -7.8 dBm] を、UTC-PD を用いたフォトミキシングによって生成した。この 300 GHz 帯 FDM 信号を、ホーンアンテナ (利得: 27 dBi)、レンズを介して 1 m 空間伝搬した後、図 2 の受信器を用いて各チャンネルの分離を行った。

(2) 実験結果

図 4 に、300 GHz 帯 FDM 信号を発生するために図 3 の UTC-PD に入射する、半導体レーザ LD2 からの局発光と光 FDM 信号 [(a) 2 x 4 Gbit/s、(b) 4 x 8 Gbit/s] のスペクトルを示す (入射光強度が最大の場合)。局発光、信号光の強度は両者とも 12.0 dBm で、生成された 300 GHz 帯信号の強度は -7.8 dBm であった。

表 1 に、全分離チャンネルの最良符号誤り率 (Bit error rate: BER) を示す。図 5 に、様々な容量の FDM 信号の分離チャンネルの、最小誤り率時のアイパターンの例を示す。全分離チャンネルにおいて、7%硬判定前方誤り訂正の閾値 (3.8×10^{-3}) [8]以下の誤り率が得られた。1 チャンネルのみ使用時の最良誤り率は、 6.2×10^{-8} (4 Gbit/s)、 4.2×10^{-6} (8 Gbit/s) であった。ビットレート、およびチャンネル数の増加に伴い、誤り率、およびアイパターンが劣化しているのは、フィルタの消光比が 14 dB 程度と十分ではなく、チャンネル間クロストークが増加したためである。また、分離時に有効時間 20 ps の抽出を行わなかったこと、受信ダイオードの感度・帯域制

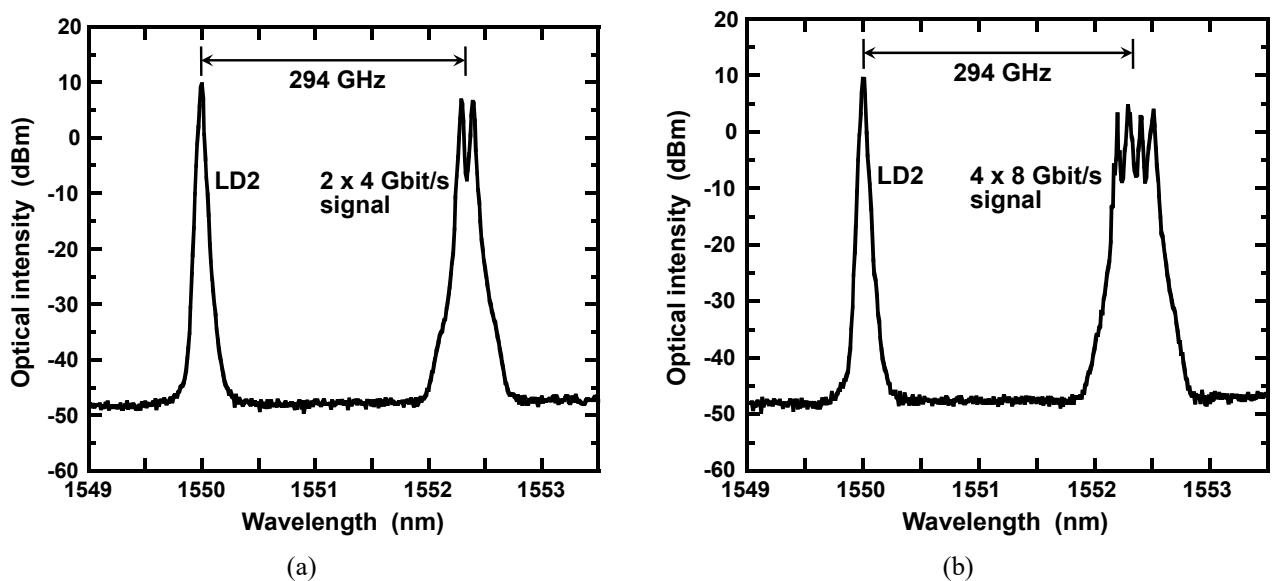


図 4 局発光 LD2 と光 FDM 信号のスペクトル例 [(a) 2 x 4 Gbit/s、(b) 4 x 8 Gbit/s]

表 1 全分離チャンネルの最小符号誤り率

Signal capacity	Spectral efficiency (bit/s/Hz)	BER of CH1	BER of CH2	BER of CH3	BER of CH4
2 x 4 Gbit/s	0.32	1.8×10^{-5}	1.0×10^{-5}		
2 x 8 Gbit/s	0.64	9.2×10^{-4}	8.8×10^{-4}		
4 x 4 Gbit/s	0.32	2.3×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.2×10^{-4}	2.5×10^{-4}
4 x 8 Gbit/s	0.64	3.2×10^{-3}	3.7×10^{-3}	3.8×10^{-3}	3.1×10^{-3}

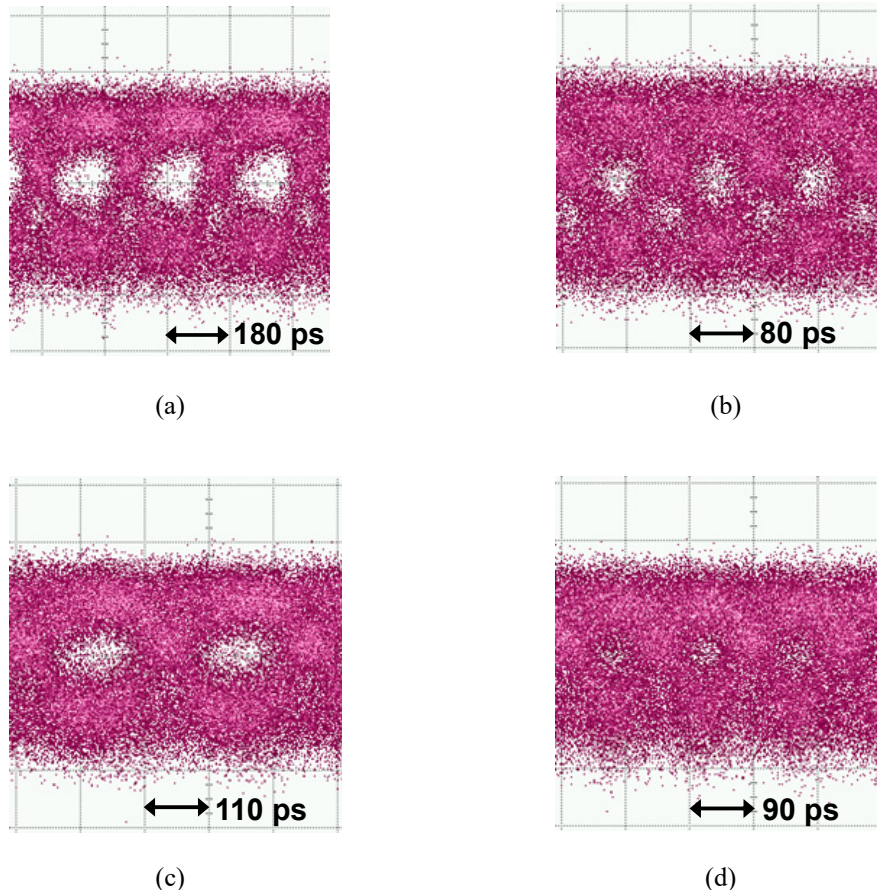


図5 分離チャネルのアイパターン (a) 2 x 4 Gbit/s 信号の CH2, (b) 2 x 8 Gbit/s 信号の CH2, (c) 4 x 4 Gbit/s 信号の CH1, (d) 4 x 8 Gbit/s 信号の CH4

限なども劣化要因として考えられる。4 チャンネル信号の分離では、クロストークの影響が少ない外側周波数帯の CH1, 4 の誤り率は、内側の CH2, 3 の誤り率よりも若干良好であった。シンボルを同期していない 25 GHz 間隔の 2 x 8 Gbit/s FDM 信号を、FSR 50 GHz の MI 型フィルタ 1 段で分離した際の誤り率は 1.7×10^{-3} 、 1.5×10^{-3} であった。従って、今回用いた手法は、高周波数利用効率 FDM 信号の分離に有効なことがわかった。

2-3 今後の展開

本研究の実施によって、高い周波数利用効率を持つ THz 帯 FDM 信号のチャネル分離技術を実現できた。今後は OFDM 信号の分離を実現する予定である。

本研究で用いたバルク空間系のフィルタは、サイズが大きくなり、動作安定化が難しい欠点がある。また、バルク構成では、将来の高機能 THz 帯信号処理回路の実現も難しい。そのため今後は、回路の集積化に関する検討にも着手する。

THz 帯通信は、光ファイバを敷設不可の場所・状況での超高速無線通信（中継会場・ビル間・室内などでの臨時超高速通信、医療現場での高精細診断画像・見守り動画のリアルタイム伝送、河川・渓谷などのケーブル敷設が困難な場所での超高速通信、災害時の光ファイバ断線時の臨時高速回線構築など）の実現に貢献できる。コロナ禍のような感染症が蔓延している際の、対面を避けた超高速短距離無線通信への展開も期待できる。本研究で得られた内容は、このように社会的に有用な THz 帯通信の進展の一助になると考えられる。

3 まとめ

THz 波用の MI 型フーリエ変換周波数フィルタを用いて、300 GHz 帯可変容量 FDM 信号 (2 x 4 Gbit/s ~ 4 x 8 Gbit/s) の分離を行い、フィルタの有用性を確認した。全分離チャネルにおいて、7%硬判定前方誤り訂正の閾値 (3.8×10^{-3}) 以下の誤り率が得られた。N x 8 Gbit/s 信号の周波数利用効率は 0.64 bit/s/Hz であった。

【参考文献】

- [1] T. Nagatsuma, G. Ducournau, and C. C. Renaud, “Advances in terahertz communications accelerated by photonics,” *Nature Photonics*, vol. 10, pp. 371-379, June 2016.
- [2] T. Ishibashi, Y. Muramoto, T. Yoshimatsu, and H. Ito, “Unitraveling-carrier photodiodes for terahertz application,” *J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 20, no. 6, article no. 3804210, Nov./Dec. 2014.
- [3] H. Shams, T. Shao, M. J. Fice, Member, P. M. Anandarajah, C. C. Renaud, F. V. Dijk, L. P. Barry, and A. J. Seeds, “100 Gb/s multicarrier THz wireless transmission system with high frequency stability based on a gain-switched laser comb source,” *Photonics J.*, vol. 7, no. 3, article no. 7902011, June 2015.
- [4] K. Takiguchi, “Sub-carrier channel demultiplexing of THz-wave OFDM signal assisted by optical technology,” *Electron. Lett.*, vol. 53, no. 16, pp. 1123-1125, 2017.
- [5] K. Takiguchi, “40 Gsymbol/s channel-based Nyquist wavelength division multiplexing communication in a terahertz-band using optical-domain reception signal processing,” *OSA Continuum*, vol. 3, no. 9, pp. 2308-2319, 2020.
- [6] K. Takiguchi and N. Nishio, “Flexible data rate THz-wave communication using Nyquist pulses and optical-domain reception signal processing,” in *Proc. OFC2020*, paper M4I.5, San Diego, USA.
- [7] K. Takiguchi and N. Nishio, “Spectrally efficient THz-wave multi-carrier wireless communication using THz-domain Fourier transformation-type demultiplexer,” in *Proc. CLEO Pacific Rim 2022*, paper 18B-04, Sapporo, Japan, 2022.
- [8] ITU-T Rec. G.975.1, “Forward error correction for high bit rate DWDM submarine system,” 2004.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Demultiplexing of OFDM sub-carriers in 300 GHz-band using waveguide-type Mach-Zehnder interferometer-based Fourier transform filter	<i>International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) 2025</i>	2025 年 8 月
光 XOR 回路を用いたテラヘルツ帯無線通信信号の暗号化に関する基礎検討	電子情報通信学会 総合大会	2025 年 3 月
新規 THz 帯でのパルス振幅変調無線通信の実現に向けた基礎検討	電子情報通信学会 関西支部学生会 第 29 回学生会研究発表講演会	2025 年 3 月
Security enhancement of terahertz-band communication using optical exclusive OR circuit	<i>Photonics West 2025</i>	2025 年 1 月
Spectrally efficient THz-wave communication using optical-domain or direct THz-domain reception signal processing (招待講演)	<i>International Congress and Expo on Optics, Photonics and Lasers (EUROPL) 2024</i>	2024 年 6 月