

# テラヘルツ帯における直接信号処理を用いた高周波数利用効率複数搬送波信号の分離技術に関する研究

Research on demultiplexing method of spectrally efficient multi-carrier signals using direct signal processing in THz-band



瀧口 浩一 (Koichi Takiguchi, Ph. D.)  
立命館大学 理工学部電気電子工学科 教授 博士(工学)  
(Ritsumeikan University, College of Science and Engineering,  
Department of Electrical and Electronic Engineering  
Professor, Ph.D.)

IEEE、OSA、SPIE、電子情報通信学会、応用物理学会  
受賞：1997年 IEE Electronics Letters, Premium Award  
2011年 電子情報通信学会 エレクトロニクスソサイエティ、  
活動功労表彰  
2014年 電子情報通信学会 エレクトロニクスソサイエティ、  
活動功労表彰  
2019年 電子情報通信学会 論文賞  
研究専門分野：光エレクトロニクス、光通信、光波センシング、  
THz波フォトリソ、光コンピューティング

## あらまし

従来の無線通信を超える通信容量(10 Gbit/s以上)を実現可能なテラヘルツ (THz) 帯 (0.3~10 THz) は、超高速・大容量の 6G (第6世代移動通信システム) 以降の無線通信システムへの適用が期待されている。THz帯通信の一層の大容量化を目指して、各種の高周波数利用効率の複数搬送波通信の検討が進められている。本研究では、THz帯複数搬送波通信の高速化、構成簡便化、および低消費電力化のため、THz波の波動性(干渉特性)を活用したTHz帯直接での受信信号チャンネル分離処理技術の検討を進めた。300 GHz (0.3 THz)帯において、干渉計型周波数フィルタを用いることによって、可変容量の高周波数利用効率周波数分割多重 (Frequency division multiplexing: FDM) 信号を直接分離受信する技術を実現した。

## 1. 研究の目的

本研究では、ミリ波・光波の中間周波数帯であるTHz

帯信号を、THz波の波動性(干渉特性)を活用して、THz帯で直接、実時間分散フーリエ変換処理する新手法を開拓することを目的とした。また、本手法をTHz帯での高周波数利用効率・複数搬送波無線信号のチャンネル分離に実際に適用することによって、その有用性を示すことを目標とした。非対称マッハツェンダ干渉計 (Asymmetric Mach-Zehnder interferometer: AMZI) 型周波数フィルタ、マイケルソン干渉計 (Michelson interferometer: MI) 型周波数フィルタをTHz波用分散フーリエ変換素子として提案、実現し、チャンネル分離へ適用することを目指した。

広帯域なTHz帯での無線通信は、光通信に匹敵する10 Gbit/s以上の高速通信が可能である。今後、100 Gbit/s超の超高速通信の実現のためには、信号の高周波数利用効率・複数搬送波化が必要である。直交周波数分割多重 (Orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 通信がその一例である。OFDM通信は、複数の直交サブキャリアチャンネル信号を変調速度に相当するチャンネルポーレート間隔で周波数分割多重するもので、高い周波数利用効率 (1 baud/Hz) を実現できる[1], [2]。スペクトルが重なったOFDMチャンネルの分離にはフーリエ変換が必須であるが、消費電力が大きく速度限界がある現状の電気領域分離から発想、視点を変え、波動性を用いたTHz帯直接での低消費電力・実時間分離を目指した。

光通信との接続用・光通信の代替用無線信号のチャンネル、複数チャンネルを束ねた無線チャンネルの分離などの高ポーレート信号の分離を主な対象とし、細かな単位のチャン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。

## 2. 研究の背景

THz帯無線通信では、主に単一搬送波の2値信号が用いられていた。しかしこの方法では、40 Gbit/s程度の通信速度が限界である。今後必要となるさらなる高速化 (100 Gbit/s超クラス) のためには、信号の多値化の他に、高周波数利用効率の複数の搬送波信号を多重化する技術も必要である。電気領域受信信号処理を用いた数10 Gbit/sクラスの複数搬送波通信について

# テラヘルツ帯における直接信号処理を用いた高周波数利用効率複数搬送波信号の分離技術に関する研究

Research on demultiplexing method of spectrally efficient multi-carrier signals using direct signal processing in THz-band

は、波長分割多重 (Wavelength division multiplexing: WDM) [3], [4], OFDM[1]を用いた報告がある。実時間ではなくオフライン処理を行っている例が多い。また、速度数 10 Gbit/s クラスの THz 帯複数搬送波通信において、筆者らによって光領域受信信号処理を活用した検討が行われている[2], [5]-[7]。実時間処理が可能であるが、RF (Radio frequency) 帯信号の併用による帯域制限、光領域処理による構成の複雑化、コストの増大などの課題があった。

そのため、大容量 THz 帯信号の受信信号処理を、高速・低消費電力で THz 帯直接で行いたいとの考えに至った。

## 3. 研究の方法

### 3.1 非対称マツハツェンダ干渉計型周波数フィルタによる受信信号分離

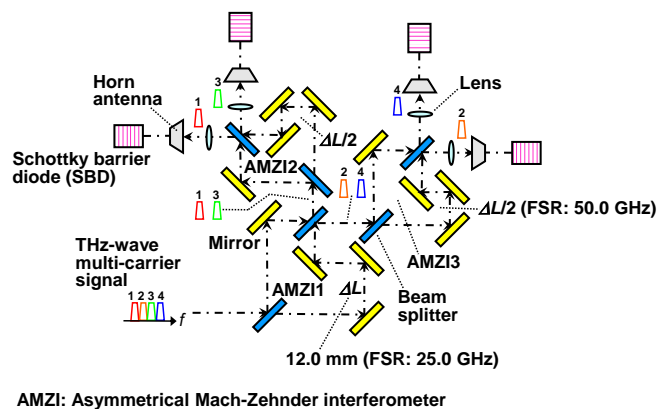


図1 非対称マツハツェンダ干渉計型フィルタを用いた THz 帯受信器の構成

図1に、THz波用のバルク素子(ビームスプリッタ、ミラー、レンズ)を用いた AMZI 型フーリエ変換周波数フィルタを主構成要素とする、THz 帯受信器の構成を示す[8]。アーム長差 $\Delta L$  (12.0 mm) の AMZI1 [FSR (Free spectral range) : 25 GHz] の2出力に、アーム長差 $\Delta L/2$  (6.0 mm) の AMZI2, 3 (FSR : 50 GHz) を接続することによって、12.5 GHz 間隔の4チャンネルの FDM 信号を分離可能なフィルタを構成できる。本来は、12.5 GHz 間隔の  $4 \times 12.5$  Gbaud の OFDM 信号の分離用であるが、狭い周波数間隔で配置された FDM 信号のチャンネル分離にも適用できる[9]。中心周波数 306.3 GHz、周波数間隔 12.5 GHz の、各チャンネルのシンボルを同期させた 2/4 チャンネル THz 帯 FDM

信号 [On-off keying (OOK) 信号、Pseudo-random bit sequence (PRBS) :  $2^{15}-1$ ] を、UTC-PD (Unitraveling-carrier photodiode) [10]を用いた高速フォトミキシングによって生成した。生成 THz 帯 FDM 信号を、ホーンアンテナ (利得 27 dBi)、レンズを介して送信した後、AMZI2, 3 の出力部に、レンズ、ホーンアンテナとショットキーバリアダイオードを配置し、分離信号を包絡線検波する。各分離チャンネルの符号誤り率を測定した。2チャンネル FDM 信号の分離には AMZI1 のみを用いた。

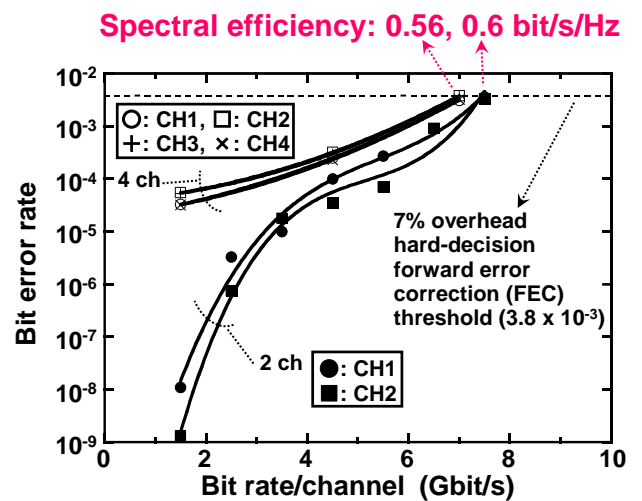


図2 300GHz 帯 FDM 通信の符号誤り率特性

図2に、チャンネルあたりのビットレートに対する分離チャンネルの符号誤り率 (Bit error rate: BER) の測定結果を示す。UTC-PD の最大出力 (-7.9 dBm) の範囲内で、チャンネルあたり 1.5 Gbit/s から 12.5 Gbit/s までの分離信号の評価を行った。2チャンネル FDM 通信ではチャンネルあたり 1.5 Gbit/s から 7.5 Gbit/s の範囲で、4チャンネル FDM 通信ではチャンネルあたり 1.5 Gbit/s から 7.0 Gbit/s の範囲で、7%硬判定誤り訂正 (Forward error correction: FEC) の閾値 ( $3.8 \times 10^{-3}$ ) [11]以下の誤り率が得られた。ビットレートの増加に伴い受信特性が劣化している。また、2チャンネルよりも4チャンネル通信の特性が劣化している。これは、フィルタの消光比が 12 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・帯域制限なども劣化要因として考えられる。4チャンネル通信では、クロストークの影響が少ない外側周波数帯の CH1, 4 の特性が、内側の CH2, 3 の特性よりも若干良好であった。

まとめると、AMZI を 2 段縦続接続して、4チャンネル

# テラヘルツ帯における直接信号処理を用いた高周波数利用効率複数搬送波信号の分離技術に関する研究

Research on demultiplexing method of spectrally efficient multi-carrier signals using direct signal processing in THz-band

ルまでの THz 帯 FDM 無線通信信号を THz 帯で直接分離可能な受信器を構成した。これを用いることによって、チャンネル間隔 12.5 GHz の 2 ch x 1.5~7.5 Gbit/s (最大周波数利用効率 0.6 bit/s/Hz)、4 ch x 1.5~7.0 Gbit/s (最大周波数利用効率 0.56 bit/s/Hz) の 300 GHz 帯 FDM 信号の分離を実現した。

## 3.2 マイケルソン干渉計型周波数フィルタによる受信信号分離

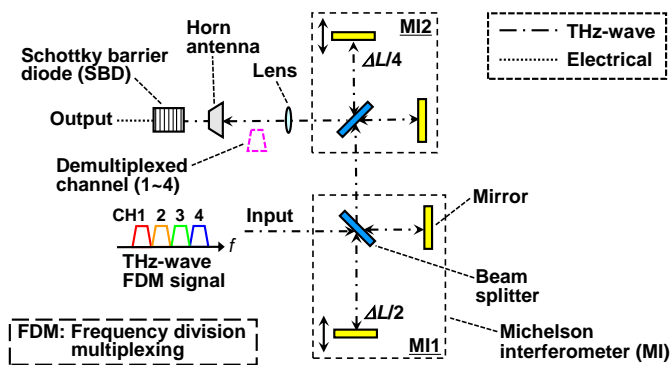


図3 マイケルソン干渉計型フィルタを用いた THz 帯受信器の構成

表1 各分離チャンネルの最良符号誤り率

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	$1.8 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$		
2 x 8 Gbit/s	0.64	$9.2 \times 10^{-4}$	$8.8 \times 10^{-4}$		
4 x 4 Gbit/s	0.32	$2.3 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-4}$	$3.2 \times 10^{-4}$	$2.5 \times 10^{-4}$
4 x 8 Gbit/s	0.64	$3.2 \times 10^{-3}$	$3.7 \times 10^{-3}$	$3.8 \times 10^{-3}$	$3.1 \times 10^{-3}$

図3に、THz 波用のバルク素子を用いた MI 型フーリエ変換周波数フィルタを主構成要素とする、THz 帯受信器の構成を示す[12]。アーム長差  $\Delta L/2$  ( $\Delta L$ : 12 mm) の MI1 (FSR : 25 GHz) の出力の一方に、アーム長差  $\Delta L/4$  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、AMZI 型と同様に高周波数利用効率の FDM チャンネル信号の分離にも使用できる。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。各チャンネルには OOK 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:  $2^{15}-1$ 、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)、レンズを介して空間伝搬した後、図3の受信器を用いて各チャンネルの分離を行った。

表1に、各チャンネルの最良 BER を示す。全チャンネルとも、7%硬判定 FEC の閾値 ( $3.8 \times 10^{-3}$ ) 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、 $6.2 \times 10^{-8}$  (4 Gbit/s)、 $4.2 \times 10^{-6}$  (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 AMZI 型と同様に、分離時に有効時間の抽出を行わなかったこと、受信用ダイオードの感度・帯域制限なども劣化要因であると考えられる。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、2チャンネルの誤り率は  $1.7 \times 10^{-3}$ 、 $1.5 \times 10^{-3}$  であった。従って、今回の手法は、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。

まとめると、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。チャンネルあたり 8 Gbit/s 通信の周波数利用効率は、0.64 bit/s/Hz であった。

## 4. 将来展望

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 信号のチャンネル分離技術を実現できたが、当初の目標であった OFDM 信号の分離は未達成であるので、早急に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問題がある。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 (設計・作製手法) 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・溪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

# テラヘルツ帯における直接信号処理を用いた高周波数利用効率複数搬送波信号の分離技術に関する研究

Research on demultiplexing method of spectrally efficient multi-carrier signals using direct signal processing in THz-band

ア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。

## おわりに

本研究では、高周波数利用効率の複数搬送波 THz 帯無線通信の高速化、構成簡便化、および低消費電力化のため、THz 波の波動性(干渉特性)を活用した THz 帯直接での、受信信号のチャンネル分離処理の検討を行った。干渉計型周波数フィルタを用いることによって、300 GHz 帯において、可変容量の FDM 信号を直接分離受信する技術を実現した。THz 波の波動性を活用した受信信号処理というこれまでにない新たな技術を確立し、THz 帯での高機能直接信号処理技術への展開に道を拓いた。

## 参考文献

- [1] H. Shams et al., "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, 7902011, 2015.
- [2] 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.
- [3] X. Yu et al., "160 Gbit/s photonics wireless transmission in the 300-500 GHz band," *Photonics J.*, vol. 7, no. 3, 081301, 2016.
- [4] N. Oshima et al., "Terahertz wireless data transmission with frequency and polarization division multiplexing using resonant-tunneling-diode oscillators," *Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 7, no. 5, pp. 593-598, 2017.
- [5] K. Takiguchi, "Method for converting high-speed and spectrally efficient terahertz-wave signal into optical signal," *Opt. Express*, vol. 27, no. 5, pp. 6598-6606, 2019.
- [6] 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.
- [7] K. Takiguchi et al., "Flexible data rate THz-wave communication using Nyquist pulses and optical-domain reception signal processing," in *Proc. OFC2020*, paper M4I.5, San Diego, USA.
- [8] K. Takiguchi et al., "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.
- [9] H. Sanjoh et al., "Optical orthogonal frequency division multiplexing using frequency/time domain filtering for high spectral efficiency up to 1 bit/s/Hz," in *Proc. OFC2002*, paper ThD1, Anaheim, USA, 2002.
- [10] T. Ishibashi et al., "Unitraveling-carrier photodiodes for terahertz application," *J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 20, no. 6, 3804210, 2014.
- [11] ITU-T Rec. G.975.1, "Forward error correction for high bit rate DWDM submarine system," 2004.
- [12] K. Takiguchi, "Flexible capacity wireless communication in THz-band with Michelson interferometer-based THz-wave filter," in *Proc. OFC2024*, paper W4A.2, San Diego, USA, 2024.

この研究は、令和2年度SCAT研究助成の対象として採用され、令和3～5年度に実施されたものです。