

テラヘルツ帯ナイキスト WDM 無線通信に関する研究

Research on Nyquist WDM wireless communication 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
(Professor, University of Ritsumeikan, Department of
Electrical and Electronic Engineering, College of Science
and Engineering)

IEEE, OSA, SPIE, 電子情報通信学会、応用物理学会
IEE Electronics Letters, Premium Award(1997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(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
論文賞(2019年)
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波フォトニクス

あらまし

従来の無線通信を凌駕する容量 (10 Gbit/s以上) が可能なテラヘルツ (THz) 帯 (0.1~10 THz) 無線通信は、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 (0.1~10 THz) 無線通信において100 Gbit/s超級の通信を実現するため、ナイキストWDM (Wavelength division multiplexing : 波長多重) 通信の実現を目指した。THz帯高速マルチキャリア信号のTHz帯直接での分離は困難なため、ナイキストWDM信号を光信号に変換し、光領域でマルチキャリアを実時間分離する独自手法 (光アシスト型処理) を開拓した。光アシスト型処理を活用して、300 GHz帯において、ナイキストWDM通信 (2 x 40 Gbit/s)、通信容量を適応的に可変可能なチャンネル数可変THz帯ナイキストWDM通信 (1 x 10 ~ 4 x 10 Gbit/s) を実現した。

1. 研究の目的

従来の無線通信を凌駕する容量 (10 Gbit/s以上) が可能なTHz帯通信は、シングルキャリアの2値 (On-off

keying: OOK) 信号を用いる検討が主に行われていた。しかしながら、光波帯ほどの広い周波数帯域を持たないTHz帯において、将来、100 Gbit/s超級の実時間通信を実現するためには、処理速度限界を持つDSP (Digital signal processor) に依存しないキャリア分離手法を開拓して、高周波数利用効率のマルチキャリア通信を実現する必要がある。そこで、ナイキストフィルタによってシンボルレートに等しい帯域に矩形にフィルタリングされた複数のキャリア信号を、シンボルレート間隔で配置することによって、1 symbol/s/Hzの周波数利用効率を実現できるナイキストWDM通信をTHz帯で開拓することを目標とした。フィルタリングにより、各キャリア信号の時間幅は広がるが、シンク型パルス (他の時間スロットの中心では振幅が必ず0) となるため他パルスに影響を及ぼさない[1]。

THz帯での直接のマルチキャリア分離は困難なため、ナイキストWDM信号を光信号に変換し、光領域でマルチキャリアを実時間分離する光アシスト型処理を開拓し、これによって300 GHz帯において、チャンネルあたり40 Gsymbol/s程度のナイキストWDM通信を実現することを目指した。光通信との接続用・光通信の代替用無線のチャンネル、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

研究開始前は、THz帯無線通信の研究開発は、2値OOK信号を用いたシングルキャリアの検討が主であった[2]-[4]。しかしながら、この方法では、使用素子の帯域制限によって40 Gsymbol/s程度の通信容量が限界である。また、THz帯通信におけるマルチキャリア化の検討に関する検討はまだ少なく、通常のWDM通信[5], [6]、ナイキストWDMと同じく1 symbol/s/Hzの周波数利用効率を実現可能なOFDM (Orthogonal frequency division multiplexing、直交周波数分割多重) 通信[7]-[9]などが報告がされていた。

テラヘルツ帯ナイキスト WDM 無線通信に関する研究

Research on Nyquist WDM wireless communication in THz-band

3. 研究の方法

3-1. 光アシスト型処理

大容量 THz 帯マルチキャリア信号の THz 帯直接でのチャンネル分離は難しく、THz 帯信号をダウンコンバージョンした RF (Radio-frequency) 帯での処理に関しても、各種素子の帯域制限のため信号帯域よりも中間周波数を十分高くできないため、困難が生じる。そのため、被分離信号を、キャリア周波数を信号帯域よりも十分に大きくでき、高機能な光フィルタを活用できる光波帯に変換して分離処理をおこなう光アシスト型処理の検討を行った。

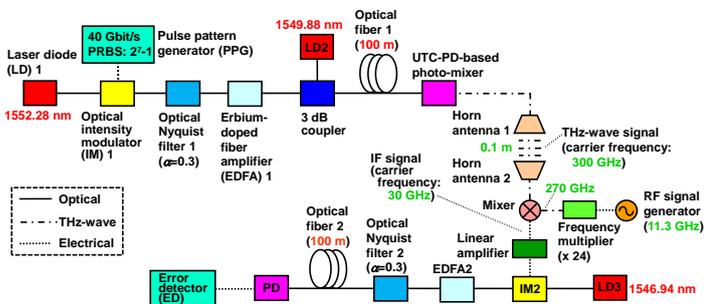


図1 THz 帯ナイキスト TDM 信号を用いた光アシスト型処理の検証実験系

図1に示す実験系を構築し、40 Gbit/s のOOK、ナイキスト Time division multiplexing (TDM) 信号を用いて本処理の初期検討を行った[10], [11]。ナイキスト光信号の生成、受信にはそれぞれ、実用的なナイキストフィルタであるルート2乗余弦型バルク光ナイキストフィルタ (ロールオフ率 $\alpha=0.3$) を用いた。超高速フォトミキサ (UTC-PD) [12]を用いたフォトミキシングによって、光ナイキスト TDM 信号から THz 帯ナイキスト TDM 信号を生成し、利得 27 dBi のホーンアンテナ 1、2 によって信号の送受信を行った。受信信号を局発信号によってヘテロダイン検出した後、中間周波数帯信号を線型増幅して光強度変調器 IM2 (バイアスをヌル点^{*2}に設定) の駆動信号として用いることによって、THz 帯信号を光信号に変換した。ルート2乗余弦型ナイキスト光フィルタ2によって、IM2で生成された2側帯波成分のうち1つを取り出し評価を行った。

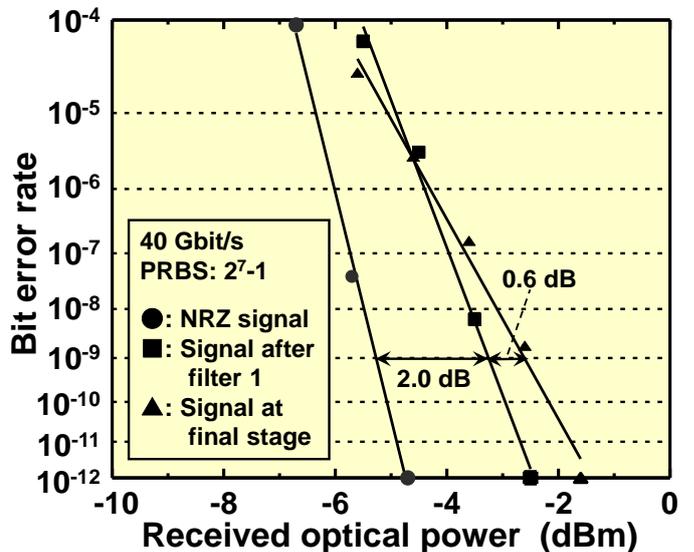


図2 THz 帯ナイキスト TDM 通信の符号誤り率特性

実験の結果、図2に示すように、40 Gbit/s ナイキスト TDM 信号の光領域での受信に成功し (受信信号の符号誤り率: 10^{-12})、光アシスト型処理を確立することができた[10], [11]。

3-2. THz 帯ナイキスト WDM 通信

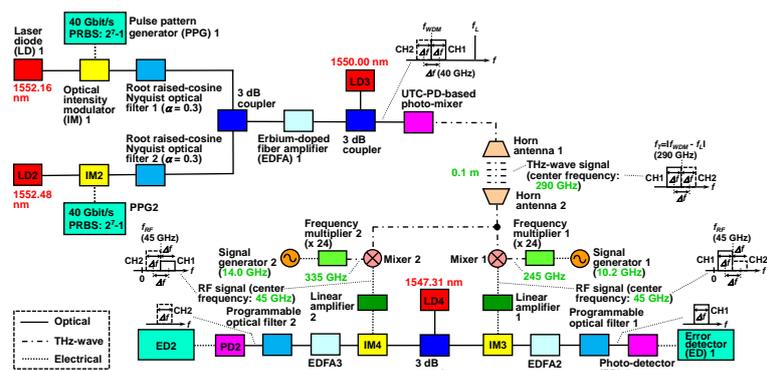


図3 THz 帯ナイキスト WDM 通信の実験系

図3に、光アシスト型処理を活用した THz 帯ナイキスト WDM 通信の実験系を示す[13]。送信側では、ルート2乗余弦型バルク光ナイキストフィルタ (ロールオフ率 $\alpha=0.3$) を用いて生成した 2×40 Gbit/s 光ナイキスト WDM 信号 (OOK 信号) を、フォトミキシングによって中心周波数 290 GHz の THz 帯ナイキスト

テラヘルツ帯ナイキスト WDM 無線通信に関する研究

Research on Nyquist WDM wireless communication in THz-band

ト WDM 信号 (2 x 40 Gbit/s) に変換した。使用素子の帯域制限のため、受信信号を 2 分割し、245 GHz、335 GHz の局発信号を用いてヘテロダイン受信を行った。各ミキサの RF 出力信号の中心中間周波数 f_{RF} は 45 GHz となり、チャンネル周波数配置が入れ替わる。ミキサ出力を光強度変調器 IM3, 4 の駆動信号として使用し、各強度変調器の主側帯波成分 $f_0 \pm f_L$ (f_0 : 光搬送波周波数、 f_L : 低周波数チャンネルの中間搬送波周波数) のうち低周波成分を液晶空間変調器構成のプログラマブル光フィルタ [14] によって抽出し、チャンネル分離を行った。分離チャンネルの周波数成分が、ロールオフ率 0.3 の 2 乗余弦形状になるように光フィルタを設定した。

に符号間干渉が生じたこと、チャンネル間のクロストークが誤り率の制限要因と考えられる。

3-3. チャンネル数可変 THz 帯ナイキスト WDM 通信

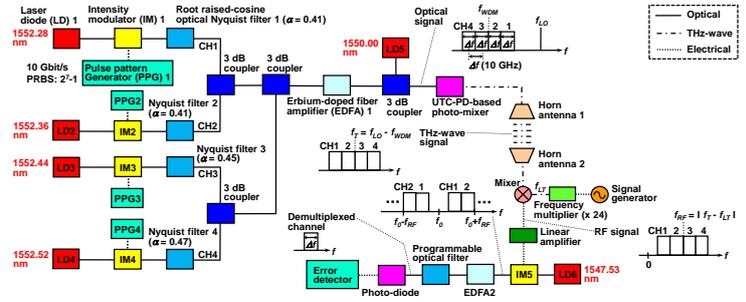


図 5 チャンネル数可変 THz 帯ナイキスト WDM 通信の実験系

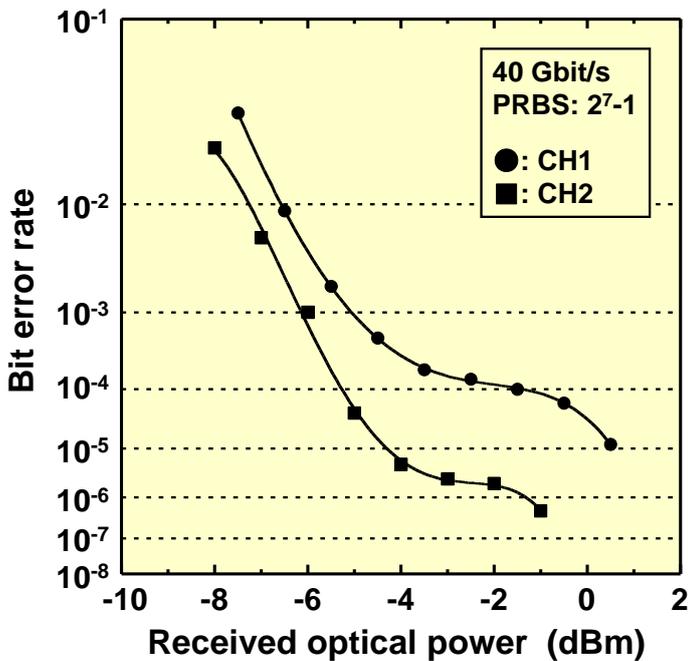


図 4 THz 帯ナイキスト WDM 通信の符号誤り率特性

図 4 に、THz 帯ナイキスト WDM 通信の符号誤り率特性を示す [13]。光アシスト型処理の活用によって、調査した範囲では世界で初めて、THz 帯ナイキスト WDM 通信を実現した。分離 2 チャンネルの符号誤り率として 1.2×10^{-5} (CH1)、 4.8×10^{-7} (CH2) が得られ、KP4 誤り訂正限界 (2.2×10^{-4}) 以下の誤り率が得られた。UTC-PD の周波数特性のリプル、分離チャンネルのスペクトルが完全に 2 乗余弦形状にならなかったため

図 5 に、光アシスト型処理を活用したチャンネル数可変 THz 帯ナイキスト WDM 通信の実験系の構成を示す (4 x 10 Gbit/s 通信の場合を例示) [15]。搬送波周波数が 10 GHz ずつ異なる 10 Gbit/s の OOK 光信号をルート 2 乗余弦型バルク光ナイキストフィルタ 1~4 を用いてスペクトル整形した後、光ファイバカプラで合波してチャンネル数 4 の光ナイキスト WDM 信号を生成した。光ナイキスト信号のチャンネル数の切り替えは、半導体レーザ LD1~4 のオン/オフによって行った。光ナイキスト信号のフォトミキシングによって THz 帯ナイキスト信号を生成した。また、偶奇チャンネル数の THz 波信号の中心周波数は、それぞれ 300, 295 GHz に設定した。無線リンク長は 0.5 m とした。受信信号を、ミキサを用いてヘテロダイン検波し、RF 帯信号に変換した。使用チャンネル数、分離チャンネル番号に応じて、局発信号周波数を 255, 265, 325, 335, 340 GHz のいずれかに設定した。中心周波数で定義した中間周波数は、30~45 GHz であった。光強度変調器 IM5 の駆動信号として RF 帯信号を用いることによって、信号を再度光領域に変換した。最後に、液晶空間変調器構成のプログラマブル光フィルタを用いて光信号中の所望チャンネルスペクトルを抽出し、符号誤り率を評価した。出力スペクトルが 2 乗余弦型形状となるように、光フィルタを設定した。

テラヘルツ帯ナイキスト WDM 無線通信に関する研究

Research on Nyquist WDM wireless communication in THz-band

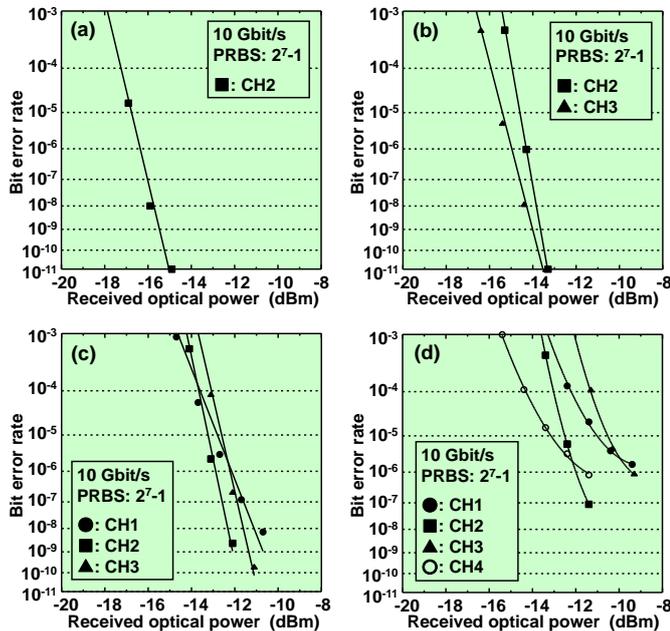


図6 チャンネル数可変 THz 帯ナイキスト WDM 通信の符号誤り率特性

図6に、分離受信チャンネル信号の符号誤り率特性を示す[15]。(a), (b), (c), (d)はそれぞれ、チャンネル数1, 2, 3, 4の信号の測定結果である。チャンネル数1~3の場合、全分離チャンネルにおいて、誤り率が 10^{-9} オーダー以下であった。チャンネル数4の場合には、最大誤り率が 1.7×10^{-6} となった。全分離チャンネルにおいて、KP4 誤り訂正限界 (2.2×10^{-4}) 以下の誤り率が得られた。チャンネル数の増加に伴ってパワーペナルティを含めた特性が劣化したのは、主に光強度変調器 IM5 の非線形特性によって生じるチャンネル間クロストークのためである。

4. 将来展望

今後は、光アシスト型処理における光フィルタの小型・低消費電力・安定化に向け、集積光技術の適用が必要である。THz帯通信の一層の大容量化のためには、多値変調信号の使用はもちろんのこと、今回検討を行った高周波利用効率のチャンネル多重化の他に、モード分割多重技術の活用、さらに多くの帯域を利用できる搬送波周波数の高周波数化などが重要になる。

本研究の成果は、光ファイバを敷設できず、移動通信が必要な場所での超高速・大容量通信（中継会場、

物理的に光ファイバを敷設できない場所での光通信の代替、災害時における光ファイバ断線時の臨時回線構築など）の実現に寄与できると考えられる。

おわりに

THz 帯無線通信において 100 Gbit/s 超級の通信を実現するため、ナイキスト WDM 通信の検討を行った。THz 帯信号を光信号に変換し、光領域でマルチキャリアを実時間分離する光アシスト型処理を実現し、活用することによって、300 GHz 帯において、ナイキスト WDM 通信 (2×40 Gbit/s)、通信容量を適応的に可変可能なチャンネル数可変 THz 帯ナイキスト WDM 通信 ($1 \times 10 \sim 4 \times 10$ Gbit/s) を実現した。

用語解説

- *1 2乗余弦型バルク光ナイキストフィルタの形状を定めるパラメータで、0 から 1 までの値を取る。ロールオフ率が小さいほど理想的な矩形フィルタに近づいていくが、サンプリング点近傍での波形変動が大きくなり、サンプリング点が揺らいだ場合の特性劣化が大きくなる。
- *2 強度変調器の出力が 0 となるバイアス点で、この近傍では、入力電圧に対して出力光電界が良好な線形性を示す。

参考文献

- [1] H. Nyquist, "Certain topics in telegraph transmission theory," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 47, no. 2, pp. 617-644, 1928.
- [2] A. Hirata et al., "Transmission characteristics of 120-GHz-band wireless link using radio-on-fiber technologies," *J. Lightwave Technol.*, vol. 26, no. 15, pp. 2338-2344, 2008.
- [3] T. Nagatsuma et al., "Terahertz wireless communications based on photonics technologies," *Opt. Express*, vol. 21, no. 20, pp. 23736-23747, 2013.
- [4] N. Oshima et al., "Wireless data transmission of 34 Gbit/s at a 500-GHz range using resonant-tunnelling-diode terahertz oscillator," *APL*

テラヘルツ帯ナイキスト WDM 無線通信に関する研究

Research on Nyquist WDM wireless communication in THz-band

- Photonics*, vol. 1, no. 8, pp. 1897–1898, 2016.
- [5] X. Yu et al., “160 Gbit/s photonics wireless transmission in the 300–500 GHz band,” *Photonics J.*, vol. 7, no. 3, 081301, 2016.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] K. Takiguchi et al., “Sub-carrier channel demultiplexing of THz-wave OFDM signal assisted by optical technology,” *Electron. Lett.*, vol. 53, no. 16, pp. 1123–1125, 2017.
- [9] K. Takiguchi et al., “Real-time wireless OFDM communication in THz-band using optical DFT processing,” *in Proc. MWP2017*, paper We2.4, Beijing, China.
- [10] K. Takiguchi et al., “Method for converting high-speed and spectrally efficient terahertz-wave signal into optical signal,” *Opt. Express*, vol. 27, no. 5, pp. 6598–6606, 2019.
- [11] K. Takiguchi et al., “Chromatic dispersion tolerance of high-speed and spectral-efficient optical signal converted from terahertz-wave signal,” *Electron. Lett.*, vol. 55, no. 7, pp. 396–398, 2019.
- [12] T. Ishibashi et al., “Unitraveling-carrier photodiodes for terahertz application,” *J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 20, no. 6, 3804210, 2014.
- [13] K. Takiguchi et al., “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.
- [14] M. A. F. Roelens et al., “Dispersion trimming in a reconfigurable wavelength selective switch,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 26, no. 1, pp. 73–78, 2008.
- [15] 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.

この研究は、平成29年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成30～令和2年度に実施されたものです。