

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14745

研究課題名（和文）次世代アナログ光ファイバ無線用高線形性光変調器の高度化に関する研究

研究課題名（英文）Study on high-linearity optical modulator for next-generation analog radio-over-fiber systems

研究代表者

山口 祐也（Yamaguchi, Yuya）

国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワーク研究所フォトニックICT研究センター・研究員

研究者番号：30754791

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではアナログ光ファイバ無線の高度化のための光変調デバイスに関する研究開発を行った。提案してきた高線形性LN光変調デバイスに対して、薄膜基板構造を新規に導入することで2倍以上の基本性能向上を達成した。また、線形変調技術の拡張として4値デジタル変調器を開発し、光変調と同時に行われる光領域波形整形について動作実証を行った。Beyond 5Gに向けた取り組みとしてミリ波帯で高効率に動作する光変調器の開発に取り組み、薄膜LN構造にて従来比6dB以上の高感度化を達成した。また、新規デバイスを用いた光ファイバ無線実験では、キャリア周波数100GHzにて70Gbpsを超える信号伝送を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Beyond 5Gや6Gに代表される次世代無線通信や、それを支えるネットワークである次世代光ファイバ通信はICT社会を進化させていくために重要な社会インフラである。本研究では、このような新しいネットワークのための物理層における研究開発として、これまで使用することが難しかった高周波数帯で高効率且つ高線形に動作する光変調器の新規開発に取り組み、将来ネットワークへの適用可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：We conducted research and development on optical modulation devices for the advancement of analog radio-over-fiber technology. For the high-linearity LN optical modulator that we have proposed, we have achieved a basic performance improvement of more than twice by using a thin film substrate structure. We also developed a 4-level digital intensity modulator as an extension of the linear modulation technology. We demonstrated the operation of analog waveform shaping in optical domain performed at the same time as optical modulation. As an initiative for Beyond 5G, we worked on the development of an optical modulator that works with high efficiency in the millimeter-wave band, and achieved a high sensitivity of 6 dB or more compared to the conventional one with a thin film LN structure. As a demonstration of Beyond 5G link, radio-over-fiber signal transmission exceeding 70 Gbps was achieved at a carrier frequency of 100 GHz by using the newly developed device.

研究分野：光ファイバ通信

キーワード：光エレクトロニクス 光変調器 光ファイバ無線 光ファイバ通信

## 1. 研究開始当初の背景

Internet of Things (IoT) や自動運転に代表されるように、モバイルネットワークの需要は益々高まっている。スマートフォンのような携帯端末によるデータ通信量も急速に増加しており、これらの要求に対応可能なモバイルネットワークの高度化が喫緊の課題である。モバイルネットワークの高度化は一般ユーザーの利便性向上のみならず、スマートファクトリーやスマート農業のようなこれまでの産業形態を一変させるほどの可能性を有している。このように適用可能なアプリケーションが極めて広い一方で、各アプリケーションに応じて要求されるネットワーク性能が異なる。例えば、スマートフォンでは主に下りの大容量通信が求められるのに対して、自動運転では高速移動体の制御のために超低遅延性が求められている。このような幅広く且つ高水準の要求をすべて満たすことは現状の技術の延長では困難であることから、5G/Beyond5Gでは高速大容量(enhanced Mobile Broadband)、低遅延(Ultra-Reliable and Low-Latency Communications)、多数同時接続(massive Machine Type Communication)というように大きく3種に分類し、それぞれの要求性能に適応的なネットワークを構成することが検討されている。

これらの性能の特性について考えると、ピークレートと同時接続数については基地局の増設もしくはマイクロセル化などにより、現状技術の延長で理論的には実現可能である。もちろん実装のためにはコスト考慮する必要があるが学術的な意味では単純な並列化で対応可能である。その一方で、遅延については現状装置の並列化では向上を見込めないものである。低遅延性は今後の自動運転やドローン等の高速移動体制御には最重要なパラメータであるが、低遅延化には抜本的なシステムの革新が必要である。そこで、Beyond5G/6Gに向けて世界的に注目を集めている技術がアナログ光ファイバ無線によるモバイルフロントホールリンクである。なお、遅延や基幹網光ファイバリンクの負担を減らすためにエッジコンピューティングと呼ばれるエッジデータセンターを各モバイル収容局の近くに配置する構成が検討されている。モバイルフロントホールはモバイル局舎の無線信号生成器(Baseband Unit, BBU)と無線子局であるアンテナを繋ぐ光ファイバリンクである。現状では伝送プロトコルとしてCPRIを採用しているものが多く、これは送信したい無線の信号波形を一度デジタル化し、そのデジタル信号を光ファイバリンクを通して無線機(Remote Radio Head, RRH)と接続されたアンテナまで伝送する方式である。この技術はデジタル光ファイバ無線の一形態であり、アナログ光ファイバ無線と比べた場合には許容される信号歪みや雑音耐性が大きい一方でデータ伝送効率が悪く、遅延も大きい。例えば、CPRI option3規格では無線のデータレートに対して、モバイルフロントホールの光ファイバリンクに要求されるデータレートは16倍にも及び(直接のフォーマット変換ではなく、量子化信号波形転送のため)、これは5Gのように無線のピークレートが20Gbpsならば光ファイバリンクは320Gbpsの伝送容量が必要であることを意味する。将来のBeyond5G/6Gではピークレートが100Gbpsとも想定されているが、その際には1.6Tbpsの光ファイバリンクが必要となり、近い将来には現状の技術の延長だけでは破綻することが推察される。なお、基幹網の光ファイバリンクでは1コア当たり最大100Tbps程度が物理的な性能限界であるが、これは波長多重等の信号多重技術を駆使した技術であり、コストや信号多重分離に起因する遅延等を考慮するとモバイルフロントホールのようなアクセス網に適用することは現状では現実的ではない。また、遅延に関してもアナログ光ファイバ無線の方が優位性がある。物理限界は電波と光の伝搬遅延であるが、それに信号処理による遅延を加えたものが総遅延量となる。この観点で、ほぼ限界まで信号処理を減らしたものがアナログ光ファイバ無線である。

## 2. 研究の目的

アナログ光ファイバ無線は現状のデジタル光ファイバ無線技術の延長では実現できないような将来の大容量・低遅延無線ネットワークを実現し得る技術であるが、アナログ光ファイバ無線では物理レイヤ、特にデバイス自体に高い線形性が求められる。一方で、この線形性や相互変調歪みに代表される信号歪みは、電子(高周波)デバイスと光デバイスで比較した場合に大きな乖離があるのが現状である。本研究では、この乖離を解消するために極めて高い線形性を有する光変調デバイスを開発する。さらに、高周波信号と光信号で信号劣化の無いシームレスな変換を可能にし、アナログ光ファイバ無線を始めとする高周波・光融合領域への貢献に資する。

## 3. 研究の方法

本研究では、アナログ光ファイバ無線技術をモバイルフロントホールに適用することを仮定して、その場合の光変調器の線形性と信号品質およびリンクのSNDRとの関係を明確化する。また、これまでに研究代表者らが蓄積している高線形光変調技術を活かして、性能要求を満たすデバイスを実現するために新規構造を導入したデバイスの試作を行う。

光変調器の線形性については、これまでに2並列マッハツェンダ干渉計型変調器を電気光学的に一体集積し、一般的なものと同様の信号入力で駆動可能かつ線形性を向上した変調器を開発してきた。現在までに静特性としての線形性向上を実験実証してきたが、デバイスの構造を改良し高周波動作特性を向上させたうえで動特性についても定量的に評価する。また、変調器の線形性に関してその物理的制限要因を明らかにする。想定しているデバイス物理モデルでは、線形性

とデバイスの基礎特性の間でトレードオフの関係がみられることから、そのトレードオフ関係において最適な設計指針を見出すことが目的である。

一方で、デバイスの基礎特性向上も恒久的な課題である。特に、モバイルフロントホールを含めたアクセス網で使用するためにはデバイスの低消費電力化と小型化が必須である。ニオブ酸リチウムを基板に用いた変調器は極めて変調歪みの小さい光変調が可能である一方で、半導体材料のデバイスと比較してデバイスサイズが大型であり消費電力も大きかった。本研究ではニオブ酸リチウム変調器における光導波路を一般的なTi拡散導波路からリブ導波路に変更することで上記課題の解決を図る。

#### 4. 研究成果

本研究では、アナログ光ファイバ無線の高度化のための光変調デバイスに関して取り組んでいる。アナログ光ファイバ無線を高性能に実現するためには、光信号と無線信号間の高効率かつ高線形性なコヒーレント変換が重要である。線形性の高い光変調デバイスとしてLiNbO<sub>3</sub>(LN)変調器があげられるが、マッハツェンダ干渉計構造による光強度変調動作は理論的に高次の高調波成分を含んでおり、それが変調歪みとして信号を劣化させる。本研究では、これらの課題を解決するための高線形な光変調デバイスを実現し、その性能向上を目指している。高線形な光変調を実現する技術について図1に示す。従来の対称二分岐干渉計から非対称4分岐干渉計へと変更し、各光路における位相変調度も基本変調度とその2倍の変調度となるように精密に設計されている。

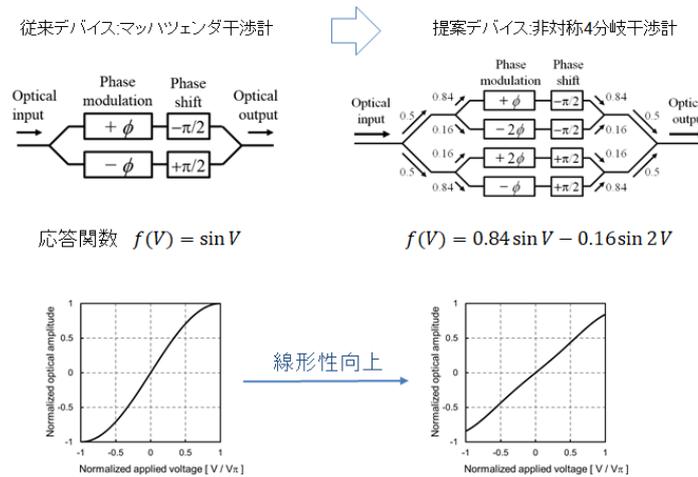


図1 高線形変調器の動作原理と等価光回路

2020年度の成果として、光変調デバイスにおける新規断面構造の導入による光変調効率の向上を確認した。LN結晶は高い電気光学効果を有する一方で、マイクロ波帯では高い誘電率を持つことから、低損失高周波線路用の基板としては適していない。そこで従来のバルクLN基板に対して光導波路を形成するのに必要な部分のみを残し、その他の支持基板に相当する箇所を低誘電率材料に置き換えることで変調器としての性能が向上することが知られている。また、本研究で提案している変調器の応答関数制御技術は薄膜構造のLN変調器にも適用可能であることを数値計算により確認している。図2に示すように、実際に試作したデバイスでも変調効率の増大が確認され、従来のバルク型と比較して駆動電圧を半分以下へと低減した。

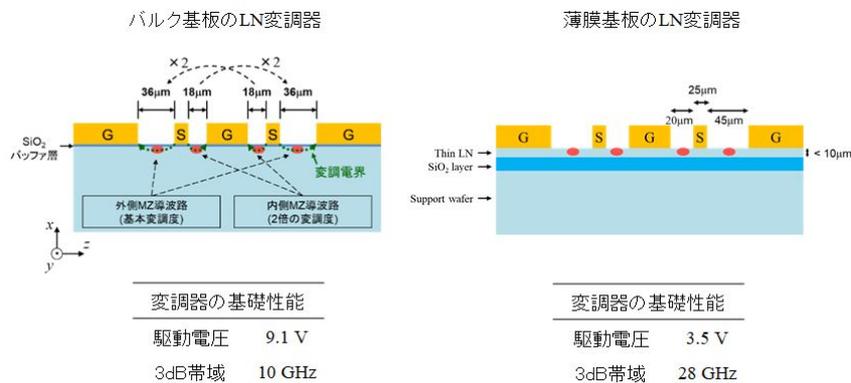


図2 薄膜構造の導入と基本性能の向上

また、デバイスの応答関数の制御技術を拡張させることでアナログな信号処理(波形整形)動作についての実証を行った[1]。今回の試作ではアナログな電圧入力に対して4値の擬似デジタルな光強度出力が得られる設計とした。4値デジタル変調器のデバイス構造と等価光回路を図3に示す。図1の高線形変調器と同様に基本変調度に対して高次の位相変調成分を持たせており、これらを合計することで非線形性を任意に調整可能となる。

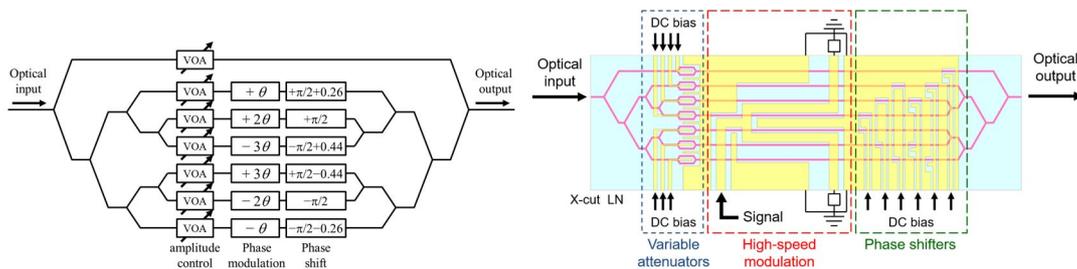


図3 4値デジタル変調器の構造

図3に示した変調器の特徴として、デジタル信号1入力で異なる変調度の光信号を生成し、合成している点が挙げられる。図4に断面構造を示すが、分岐されたRF信号電極とその信号電極が誘起する変調電界の基板内部での空間的な広がりを利用することで、共通の信号電極であっても異なる変調深さを実現している。

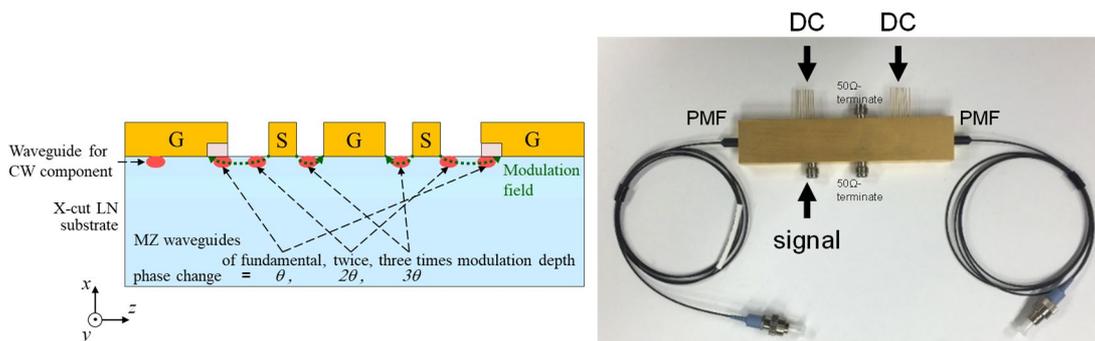


図4 4値デジタル変調器の断面構造とモジュール写真

試作したデバイスについて測定した変調曲線と設計値について図5に示す。設計通りの応答を示しており、提案している変調器応答の設計技術が高次に拡張可能であることを実証した。

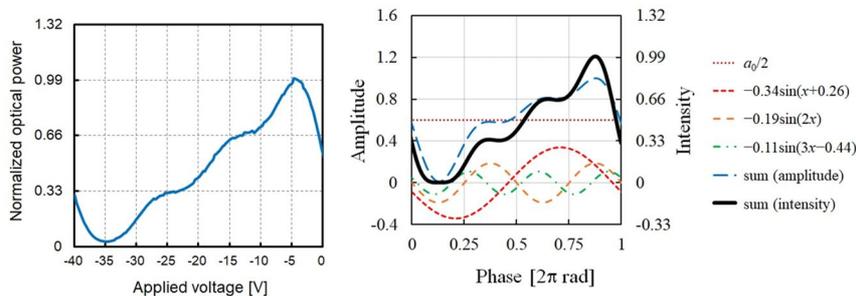


図5 4値デジタル変調器の変調曲線に関する測定結果と設計値

また、Beyond 5Gを想定したミリ波帯での光ファイバ無線(RoF)への適用を見据えた広帯域光変調器の開発も行い、それを用いたRoF通信実験を行った。従来の光ファイバ通信用変調器の動作帯域は50GHz程度であり、Beyond 5Gで想定されるようなキャリア周波数帯であるミリ波やテラヘルツで動作する光変調器は未だ研究開発例が数例ある程度である。本研究では、LN変調器に

薄膜基板構造を導入することで動作帯域のミリ波帯への拡張を試みた。デバイス断面構造の比較について図6に示す。誘電率が43(a軸)、28(c軸)であるLNに対して、10以下であるシリカやガラス材料を支持基板とすることで、電極の特性インピーダンス増加が期待でき、従来と比較して幅広い信号電極のGSGコプレーナ電極とした場合でも特性インピーダンスを外部回路と整合する50オームとすることができる。また、LNは誘電損失も大きいので、薄膜基板とすることで導電損失だけでなく誘電損失の低減も期待できる。実際に作製したデバイスでも明らかな周波数特性の違いが確認され、60GHzを超える周波数での大幅な感度の上昇を達成した。また、この変調器を用いたRoF通信実験として、キャリア周波数100GHzにおいて70Gbpsを超える信号伝送を達成した[2]。変調方式にはOFDMを用い、信号帯域幅は14GHzであった。本研究で培われた高線形変調技術とミリ波帯での高効率変調の技術を組み合わせることで、上記のような高いキャリア周波数を利用した超大容量無線伝送を達成した。

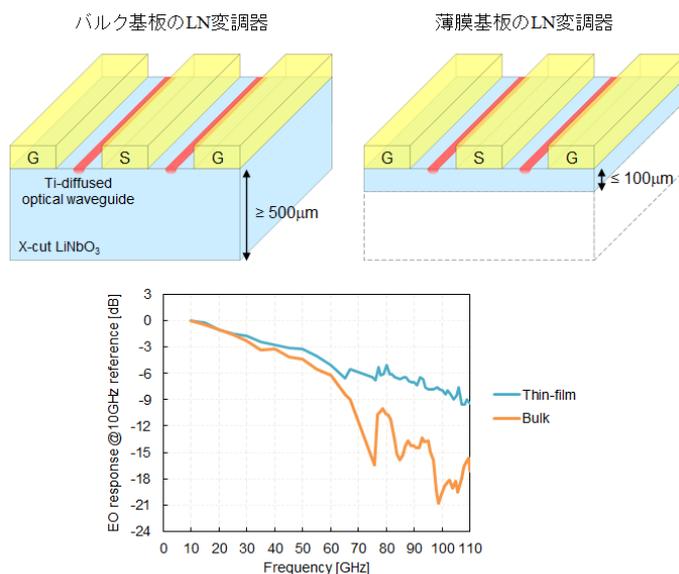


図6 バルク基板と薄膜基板における周波数特性の比較

参考文献

[1] Y. Yamaguchi, A. Kanno, N. Yamamoto, and T. Kawanishi, "Integrated Optical Intensity Modulator with Analog Waveform-shaping Function for PAM-4 Signal," International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), Th1.2, 2020.

[2] P. T. Dat, Y. Yamaguchi, M. Motoya, S. Oikawa, J. Ichikawa, A. Kanno, N. Yamamoto, and T. Kawanishi, "Transparent Fiber-Millimeter-Wave-Fiber System in 100-GHz Band Using Optical Modulator and Photonic Down-Conversion", Journal of Lightwave Technology, Vol. 40, No. 5, pp. 1483-1493, 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Dat Pham Tien, Yamaguchi Yuya, Motoya Masayuki, Oikawa Satoshi, Ichikawa Junichiro, Kanno Atsushi, Yamamoto Naokatsu, Kawanishi Tetsuya	4. 巻 40
2. 論文標題 Transparent Fiber?Millimeter-Wave?Fiber System in 100-GHz Band Using Optical Modulator and Photonic Down-Conversion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 1483 ~ 1493
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JLT.2022.3141058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Y. Yamaguchi, A. Kanno, N. Yamamoto, T. Kawanishi
2. 発表標題 Integrated Optical Intensity Modulator with Analog Waveform-Shaping Function for PAM-4 Signal
3. 学会等名 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Watanabe, Y. Yamaguchi, A. Kanno, and R. Takigawa
2. 発表標題 LNOI photonics fabricated on Si wafer by room temperature bonding
3. 学会等名 7th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------