

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02205

研究課題名(和文) 5G無線のための高性能無線 - 光信号変換デバイスの開発

研究課題名(英文) Development of advanced wireless-optical signal conversion devices for 5G mobile systems

研究代表者

村田 博司 (Murata, Hiroshi)

三重大学・工学研究科・教授

研究者番号：20239528

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：代表者がかねてから研究を進めてきた「アンテナ電極光変調器」に、八木アンテナのような3次元高利得アンテナ構造を導入することにより、信号変換効率を飛躍的に向上させた「小型高性能無線 - 光信号変換デバイス」を追究した。

電磁界シミュレータを用いて詳細な解析を行い、受信信号の電界強度を1200倍高める新構造を見出した。解析を元に設計・試作を行い、高性能信号変換デバイスを得るための基礎データの取得に成功した。さらに、アンテナ電極光変調器と波長多重通信レーザーおよび光ファイバ分散を利用した新しい無線信号復調技術を考案して、基礎実験を行った。その結果、無線信号復調が可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

当初想定していた構造を改良した新デバイス構造を用いることで、無線信号変換効率を決める電界増強係数として1200倍もの特性を得る条件を見出した。これは、重要な成果であると考えている(学会において優秀論文発表賞を受賞)。光変調器とアンテナとを融合させた「アンテナ電極光変調器」の研究は、2次元平面構造を用いたものがほとんどであるが、本研究により3次元立体構造の有用性を実証した。また、無線信号を復調・検波するための新技術も考案し、基礎実験によりその有効性を確かめた。これらは、世界的にも例を見ないものであり、独創性が高いと考えている。第5世代(5G)・第6世代(6G)無線への応用展開が期待できる。

研究成果の概要(英文)：A new wireless electro-optic (EO) modulator utilizing multi-layered stacked patch-antennas with a narrow gap was studied in detail. This device uses a structure of vertically stacked patch antennas like the Yagi-Uda antenna, with an EO crystal and low-dielectric-constant material hybrid substrate. The electric field for optical modulation can be considerably increased by using the multi-layered antenna stacked structure. With detailed analysis using HFSS, a new design to have a field enhancement factor over 1200 times is obtained. Basic experiments for the designed device fabrication were carried out to prove the usefulness of the proposed modulator. New trials for wireless signal conversion/detection utilizing the proposed EO modulator, multi-wavelength DFB lasers for WDM, and optical fiber dispersion effect were also carried out. As a result, the basic characteristics for wireless signal detection (auto-correlation) were successfully demonstrated.

研究分野：光エレクトロニクス、マイクロ波フォトニクス

キーワード：5G無線 光変調 光ファイバ無線 アンテナ

## 1. 研究開始当初の背景

近年の無線通信の社会への浸透には目覚ましいものがある。国内のスマートフォン・携帯電話等の契約数は、2019年時点で1億7千万台を超えており、なお増加を続けている。あらゆる電子機器やロボットを繋ぐIoTシステムにおいても無線技術は有用である。国内では2020年4月より第5世代(5G)無線通信サービスが開始された。

5G無線では、「高速性(平均1Gb/s、ピーク10Gb/s)」、「低遅延性(~1ms)」、「多数端末同時接続性(100万台/km<sup>2</sup>)」という優れた性能が掲げられている。これらのうちで、「高速性」と「低遅延性」については開発や実装が進んでいる。一方、「多数端末同時接続性」の実現のためには、無線端末間の相互干渉回避と、信号を混信・漏洩することなく基地局に伝送することが求められる。そこで、無線通信セルを小さくして、端末近傍で無線信号を受信・光信号変換して光ファイバで伝送する構成(RoF: Radio-over-Fiberを利用する構成)が有効になると考えられる。これには、小型で低コストな無線-光信号変換素子が求められる。特に、数万人収容のスタジアムやコンサート会場では、数百~数千個の信号変換素子が導入される可能性がある。したがって、変換素子には低消費電力(理想的には無給電)で動作することが重要になると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究は、研究代表者がかねてから研究を進めてきた「アンテナ電極光変調器」に3次元アンテナ構造を導入して、これを八木アンテナのような相互結合・高利得アンテナとして用いることにより、「小型高性能無線-光信号変換デバイス」(図1)を開発することを目的とする。

図1および図2に示すように1辺が半波長程度の正方形パッチアンテナを、スペーサー基板を介して3次元方向に2段あるいは多段に積層する。このとき、パッチアンテナの距離を適切に設定すると、各アンテナが相互に強く結合して、八木アンテナと同様の原理で、最下段のアンテナにおける受信信号が増強される。この増強された信号で変調電界を誘起して光導波路中を伝搬する光波を変調することで、無線信号を直接光信号に変換することができる。本研究では、5G無線で使用される30GHz帯において効率の良い信号変換特性を得るための構造を明らかにするとともに、新しい信号復調技術についても考究する。

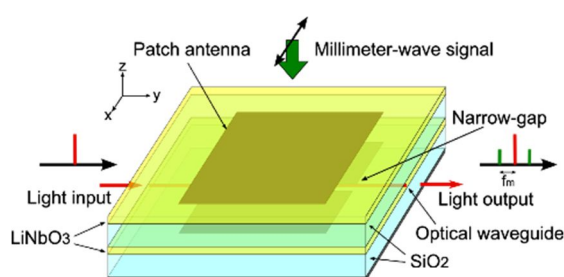


図1 3次元アンテナ構造光変調器の基本構成

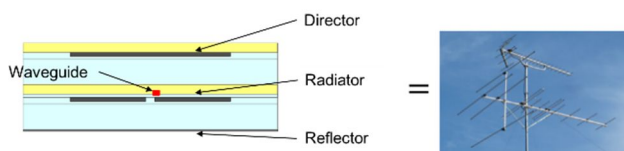


図2 断面構造と八木アンテナとの対応

## 3. 研究の方法

本研究課題においては、

- (1) 3次元アンテナ構造を用いた光変調デバイスの解析・設計
- (2) 光変調デバイスの試作・評価
- (3) 無線信号の復調(自己相関信号)技術

の3点を中心として研究を進めた。

## 4. 研究成果

### (1) 3次元アンテナ構造を用いた光変調デバイスの解析・設計

高周波電磁界シミュレータを用いて、3次元アンテナ構造光変調器の動作解析・設計を行った。無線信号をデバイスに照射すると、3次元アンテナで無線信号が受信されると同時に、アンテナ中央部分に設けた溝に強い電界が誘起される。したがって、光学結晶の表面部分に溝に沿って光導波路を作製しておくことで、誘起された強電界で生じる電気光学効果のために、導波路中を伝搬する光波が変調を受ける。これにより、無線信号が

直接光信号に変換される。このとき、3次元構造によって高効率信号変換が可能となる条件を追究した。光学結晶材料としては、高速光変調器で多用されているニオブ酸リチウム(LiNbO<sub>3</sub>)を、ベースとなる基板材料には石英ガラス(SiO<sub>2</sub>)を用いることとした。動作光波長は、光ファイバ通信において広く用いられている1.55μm帯(C-band)とした。これまでの研究で培ったアンテナ解析・設計技術を用いて詳細な特性解析を進めた。その結果、当初想定した構造(図3)を改良した新構造(図4)を用いることにより、電界増強係数を大幅に向上させて光信号変換を行うことができる条件を見出した。

得られた結果を図5および図6に示す。図5は、無線信号を照射したときにアンテナ表面に誘起される電界を、カラースケールを用いて表示したものである。アンテナの中央部分の溝(幅~5μm)に沿って、非常に強い電界が誘起されることを示している。また、図6は、図5においてアンテナ中央部分に設けた溝部分に誘起される電界振幅(最大値)の周波数特性を示している。新たに見出した新構造デバイスでは、照射された無線信号電界の1200倍もの強電界を誘起できることが分かった。これは、当初想定した構造の場合に比べて2倍以上の電界増強係数である。これまでの研究で試作したデバイスの増強係数と比較すると、十分な無線-光信号変換が期待できる。本研究課題における大きな成果だと考えている。設計した新構造光変調デバイスの諸元を表1に示す。

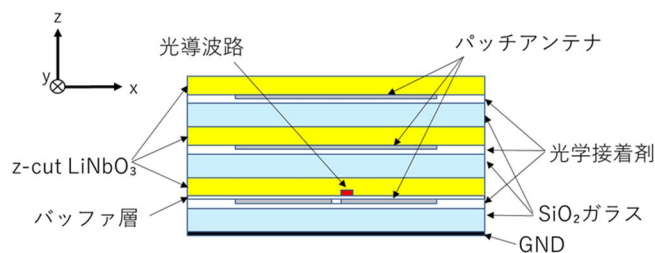


図3 3段積層アンテナを用いた光変調デバイスの断面図(当初想定した構造)

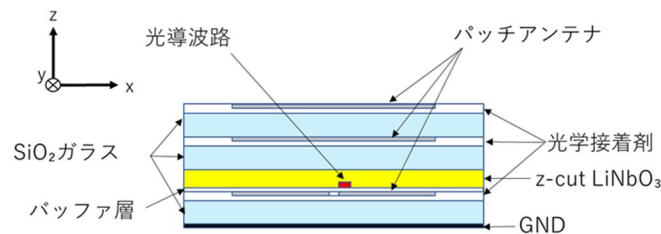


図4 新型3段積層アンテナを用いた光変調デバイスの断面図(新たに見出した構造)

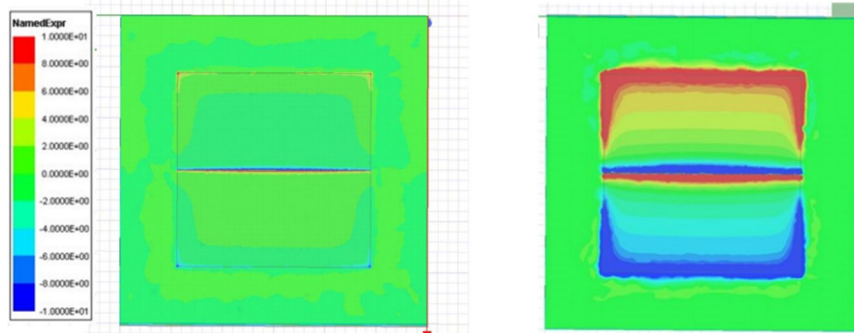


図5 無線信号を照射したときの最下段アンテナ表面上の電界分布(左:当初想定構造、右:新構造)

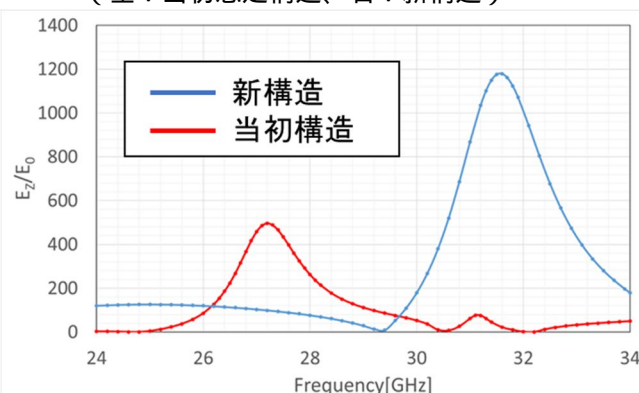


図6 アンテナ中央の溝部分(幅5μm)誘起される電界振幅(最大値)の周波数特性

表 1 設計した新構造 3 段積層アンテナ光変調デバイスの諸元

結晶・基板と各層の諸元	
電気光学材料	z-cut LiNbO <sub>3</sub> 結晶 厚さ 50 μm 比誘電率 ( $\epsilon_{rx}, \epsilon_{ry}, \epsilon_{rz}$ ) = (43,43,28)
光学バッファ層	SiO <sub>2</sub> ガラス薄膜 厚さ 0.2 μm
パッチアンテナ材料	Al 厚さ 1 μm
接着層	光学接着剤 厚さ 1.2 μm
低誘電率基板	SiO <sub>2</sub> ガラス 厚さ 250 μm 比誘電率 $\epsilon_r = 4$
パッチアンテナ	
正形状	一辺の長さ $La = 1890 \mu\text{m}$
アンテナ中央に設けた溝	幅 $d = 5 \mu\text{m}$

## (2) 光変調デバイスの試作・評価

設計した 3 次元アンテナ構造光変調器を試作した。基板には厚さ 0.25 mm の z-cut LiNbO<sub>3</sub> 結晶を用いた。光導波路の作製にはアニールプロトン交換法を、アンテナの作製には Al 蒸着とフォトリソグラフィを用いた。光学バッファ層 (厚さ ~0.2 μm) は、SiO<sub>2</sub> を高周波スパッタリングすることで作製した。LiNbO<sub>3</sub> 結晶上に作製したパッチアンテナアレイ (3 素子アレイ) の写真を図 7 に示す。パッチアンテナの中央に作製した溝 (幅 5 μm) に沿って光導波路を作製していることがわかる。図 8 は、作製した光導波路の導波特性評価を行った時の結果 (導波光スポットの近視野像) である。良好な導波特性を確認した。

さらに、光導波路とパッチアンテナを作製した LiNbO<sub>3</sub> 結晶をガラス基板の上部に光学接着剤を用いて貼り合わせた後、光学研磨処理を行った。貼り合わせ行程は完了したが、光学研磨の条件出しが不十分であり、所定の厚さの構造を作製するには至らなかった。今後、引き続き実験を行い、動作確認実験を完遂する予定である。

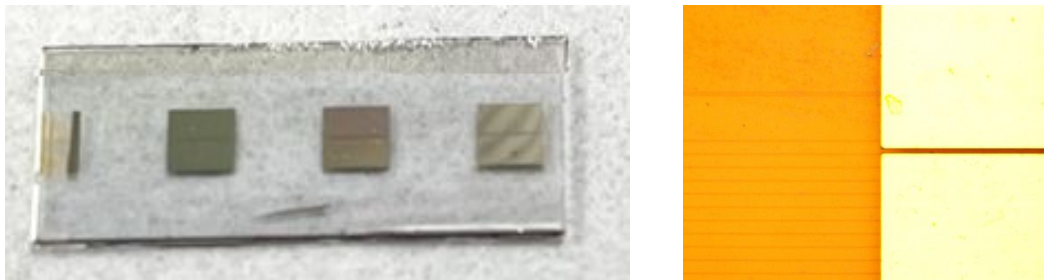


図 7 試作デバイス (3 素子アンテナアレイ)  
(右: 全体写真、左: 光導波路と溝を設けたアンテナ部分の拡大写真)

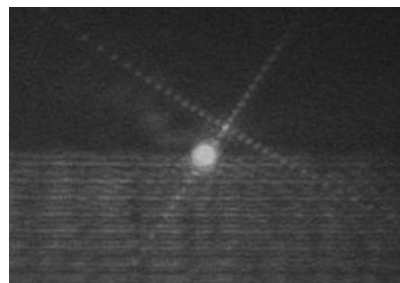


図 8 作製した光導波路からの出力光スポット (光波波長 1.55 μm)

## (3) 無線信号の復調 (自己相関信号) 技術

本研究課題において開発したデバイスは、光変調器としては光位相変調動作を行うものである。光信号から無線信号を取り出す (復調) ためには、何らかの工夫が必要である。この信号復調のために、光ファイバの分散を利用する新しい技術を追究した。

一般に、高周波信号で変調された位相変調光を、適当な長さの石英光ファイバ中を伝搬させると、強度変調光に変換することができる。これは、光ファイバの波長分散によって、位相変調光における上側波帯 / 下側波帯成分間に の位相差が生じるためである。また、見方を変えると、光ファイバは光周波数・波長に応じた遅延線路であると言える。この遅延特性と光波長多重 (WDM) 技術を組み合わせることにより、**無線信号の復調 (自己相関信号生成) を行うことができる新技術**を考案した。

図9に基本構成を示す。無線 - 光信号変換素子に、波長の異なる複数の光信号 (波長差  $\Delta\lambda = 0.1\sim 20\text{ nm}$ ) を入力して光変調を行い、長さ数 km (無線信号周波数が 30 GHz の場合には 4 km 程度) の石英光ファイバ中を伝搬させる。すると、光位相変調 光強度変調の変換と同時に、波長差  $\Delta\lambda$  に応じた時間遅延が生じる。この時間遅延を無線デジタル変調信号の 1 周期とすることで、無線信号の自己相関を取ったものを出力することができると思われる。この基礎評価実験を行った。

研究期間中に積層構造アンテナ光変調デバイスを完成させることができなかったため、別途作製した、アンテナ電極光変調デバイス (30GHz 帯アンテナと共振型電極を用いた構成) を用いて実験を行った。得られた結果の一例を図 10 に示す。この実験では、波長差  $\Delta\lambda = 15\text{ nm}$  のときに得られる時間遅延が 1 ns である。この遅延時間は、使用した 1 Gbps BPSK 信号の 1 シンボル時間 (繰返し周期) に対応している。実験を繰り返すことにより、波長差  $\Delta\lambda$  を調節することで、無線信号の自己相関に相当する波形が得られることを確認した。さらに、実験系を改良すれば、ベクトル変調された無線信号の復調も可能であるとの見通しを得た。今後、引き続き解析と実験を行い、この技術の有用性を実証する予定である。

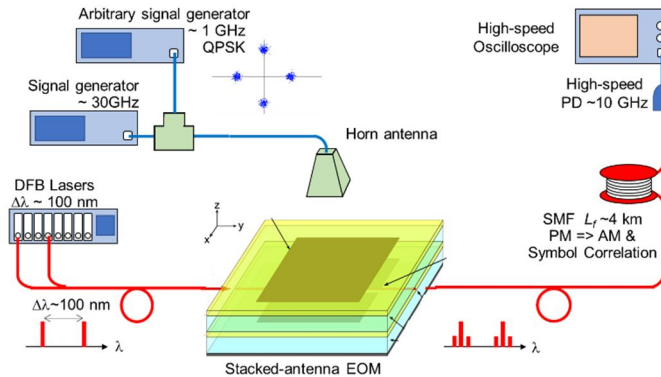


図9 無線信号復調 (自己相関信号生成) のための実験構成

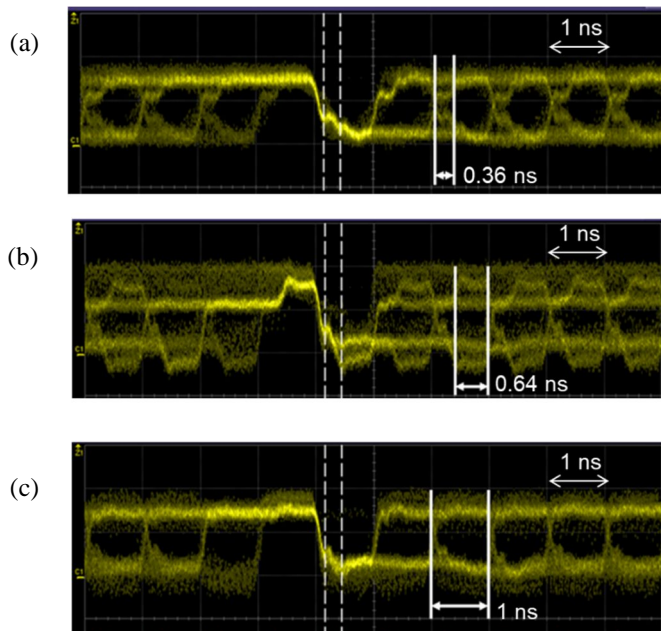


図 10 無線信号復調実験結果 (1 Gbps BPSK 変調された信号の自己相関波形)

(a)  $\Delta\lambda = 5\text{ nm}$ . (b)  $\Delta\lambda = 10\text{ nm}$ . (c)  $\Delta\lambda = 15\text{ nm}$ .

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 村田博司	4. 巻 50
2. 論文標題 5G無線のための高性能無線 - 光信号変換デバイスの開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 高羽謙汰, 村田博司
2. 発表標題 電気光学位相変調器と光ファイバー分散を用いたマイクロ波・ミリ波信号制御
3. 学会等名 電子情報通信学会 マイクロ波・ミリ波フォトニクス研究会(MWP)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田健人, 大田垣祐衣, 村田博司
2. 発表標題 5G無線通信のための多段積層構造パッチアンテナを用いた電気光学変調器
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村田博司
2. 発表標題 Beyond 5G 無線のための光・無線融合デバイスと信号処理技術
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高羽謙汰, 村田博司
2. 発表標題 高速光変調器と光ファイバー分散を用いた無線信号制御技術の提案
3. 学会等名 OPJ2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenta Takaba and Hiroshi Murata
2. 発表標題 Proposal of new wireless signal control technique using high-speed optical modulation and temporal delay caused by optical fiber dispersion
3. 学会等名 IWRIS 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020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
研究分担者	塩見 英久  (Shiomi Hidehisa)  (00324822)	大阪大学・量子情報・量子生命研究センター・特任准教授 (常勤)  (14401)	
研究分担者	大田垣 祐衣  (Otagaki Yui)  (10909914)	三重大学・工学研究科・助教  (14101)	

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
---------	---------