

光波・電波による通信・制御・計測技術

岡村 康行

大阪大学大学院 基礎工学研究科
システム創成専攻電子光科学領域

概要: 通信・制御・計測の面から、来るべきユビキタスネットワーク社会構築に寄与すべく研究に取り組んでおり、超高速光通信システム、光信号処理システムなどに不可欠なマイクロ波・ミリ波帯で動作する光制御デバイスや独立成分分析手法のアンテナシステムへの応用、光波技術を利用した生体やコロイドなどの多重散乱媒質内部状態の計測、電波技術を用いた移動体位置計測の研究を行っている。

はじめに

様々な観点から光波、電波を利用した研究を進めている。通信・制御関係では、超高速光通信システム、光信号処理システムなどに不可欠なマイクロ波・ミリ波帯で動作する光制御デバイスを導波形電気光学導波路および超高速半導体HEMTを用いて実現し、ミリ波帯SSB変調器の作製、周波数シフトとその分光応用、高速位相変調器を用いたパルス光生成などを行っている [1]。また、次世代大容量光通信システムに用いられる変調方式のひとつであるFSKのための光デバイスとして、3分岐導波路干渉計と周期分極反転構造を組み込んだ光FSK変調器を提案し、素子作製とその実証実験を行っている[2]。さらに次世代移動体通信のかなめであるRadio-on-Fiber (RoF) システムとそのために要素技術である光波とマイクロ波とを融合したマイクロ波フォトニクスに関する研究を進め、分極反転構造導波電気光学SSB変調器を用いた38GHz帯高周波信号の光ファイバによる長距離伝送に成功し、SSB変調器のシステムへの有効性を確認した[3]。さらにまた、RoFシステムを発展させた、無線信号受信アンテナを光変調器電極としたアンテナ電極電気光学変調器を提案し、試作および動作確認実験を行った[4]。強誘電体結晶の分極反転構造の応用としてマイクロ波方形導波管構造LiTaO₃を用いた差周波発生による光信号検出デバイスを提案し、その動作を確認した[5]。

無線通信システムの複雑化、需要の増大に伴い、電波資源の有用活用が望まれている。その解決の方法として、音声分離技術として知られている独立成分分析手法のアンテナシステムへの応用に取り

組み、独立成分分析による手法を電波の到来方向ブラインド推定に適用し、実証実験によりその有効性を確認した[6]。

計測関係では、光波技術を利用した生体やコロイドなどの多重散乱媒質内部状態の計測、電波技術を用いた移動体位置計測の研究を行った。生体やコロイド、エンジニアリングプラスチックなどの多重散乱媒質内部を伝搬する電磁波の理論解析、および散乱媒質内部を散乱する光波としての性質を積極的に用いたイメージング・計測を行い、擬似生体試料を用いた検証実験により新たに示した理論の有効性を確認した[7]。

研究成果

以下に具体的な研究成果を示す。

<光FSK変調器>

分極反転光変調技術を利用した光FSK変調器を新たに提案した[2]。図1にデバイスの基本構成を示す。z-cut LiNbO₃またはz-cut LiTaO₃基板に、3分岐導波路干渉計を作製し、その上部に高周波光位相変調のための進行波型電極(RF電極)と、光周波数の切替えを行うデータ信号用進行波型電極(データ電極)、3本の導波路の位相差を補正するためのDCバイアス電極の3つの電極を配している。RF電極領域には、光波と変調波の速度整合、および変調指数・位相制御のための周期分極反転構造を設けている。また、データ電極領域にも、単一のデータ信号で所望の位相変化を与えるための分極反転構造を設けている。なお、DCバイアス電極は、3本の光導波路における絶対光路長を補正すると共に、光干渉計の動作点の調整のために

用いる。このように、3分岐導波路干渉計と周期分極反転構造とを組み合わせるにより、~100GHzのオフセット周波数で動作する光FSK変調器を構成することができる。単一RF(オフセット/クロック)変調信号、単一データ信号で動作するため、従来型の高速度光FSK変調器に比べて変調電極・駆動回路系が極めてシンプルで、駆動信号の振幅・位相の調整が不要で誘導・相互結合の問題が生じないという特長がある。

図2(a)は、データ信号により位相差を $2\pi/3$ 、図2(b)は位相差を $-2\pi/3$ 与えた場合の光FSK変調器からの出力スペクトルの測定結果である。位相差に応じて+1次あるいは-1次のサイドバンドが干渉により強め合い、他方は弱め合うことを確認することができる。RF変調の変調指数を大きくすれば、キャリア成分を抑圧することも期待できる。

<アンテナ融合光変調器>

受信アンテナを変調電極として組み込んだアンテナ融合光変調器の構成を図3に示す[4]。電気光学変調器を基本としており、LiNbO₃やLiTaO₃などの強誘電体電気光学結晶の基板に光導波路および変調電極を配している。光導波路は変調効率を大きくとるために電極のエッジ直下に作製する。また、同じ基板上に、無線信号を受信するパッチアンテナを作製し、変調電極と接続している。変調

電極としてはマイクロストリップ平行結合線路を用い、両端を短絡して共振型電極としている。マイクロストリップ線路によってアンテナ電極素子を構成しているため、基板裏面は全面グランド電極である。

パッチアンテナ受信した無線信号はマイクロストリップ平行結合線路からなる共振型変調電極へ送られ変調電極上に共振定在波が発生する。そして光導波路を進む光波は、電気光学効果により変調電極下で位相変調を受ける。アンテナ電極をアレイ状に並べると高効率化が図れ、アレイ間隔・周波数によって決まる一定の指向性を持つようになり、特定の方向からの無線信号しか受信できなくなる。さらに分極反転構造を用いると、擬似速度整合により、所望の方向から入射してくる無線信号を選択的に光信号へ変換することが可能となる。

まず、1アンテナ素子のみで分極反転構造を持たないデバイスを作製し、アンテナ電極素子単体の特性を評価した。波長1.55 μm のDFBレーザーからの赤外光を光ファイバを用いてデバイスの光導波路へ結合し、周波数15GHzのマイクロ波をホーンアンテナから照射した。この時のアンテナからの出力パワーは60mWであった。デバイスからの出射光を光スペクトラムアナライザーで観測し、図4に示すような変調光のスペクトルをえた。周波数15GHzで変調されていることが確認できる。

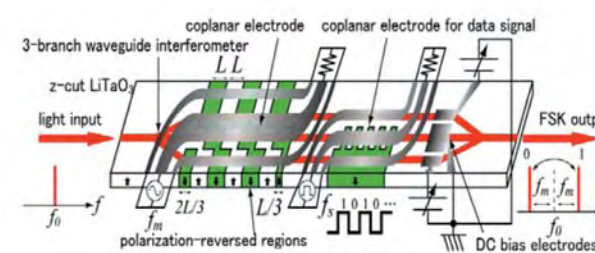


図1 光FSK変調器の基本構成

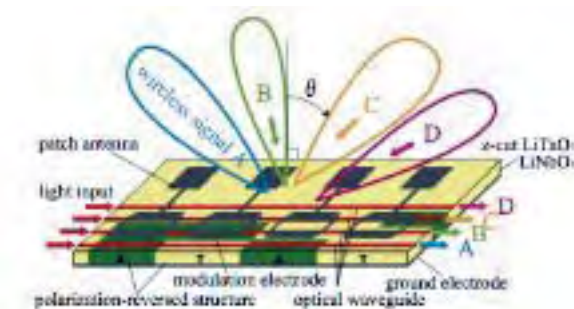


図3 アンテナ融合光変調器

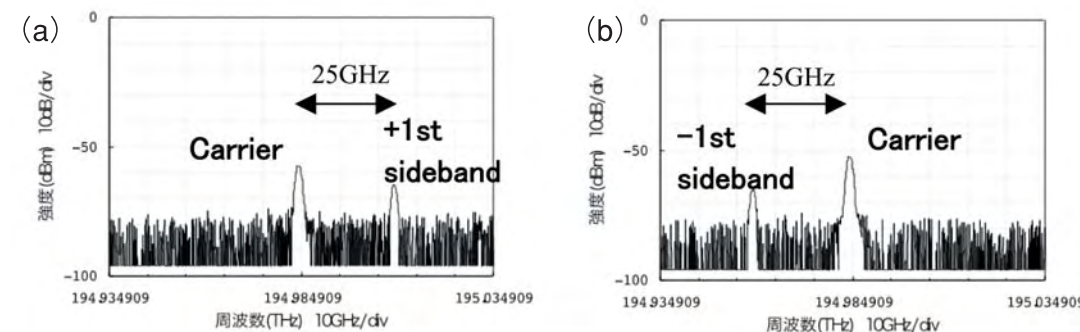


図2 光FSK変調器の出力スペクトル(位相差: (a) $2\pi/3$, (b) $-2\pi/3$)

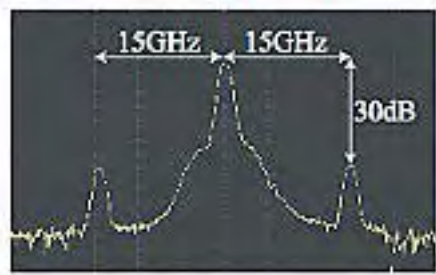


図4 1アンテナ素子光変調器からの光スペクトル (fm=15GHz, P0=60mW, λ=1.55μm)

さらに、導波路を2本配置(導波路A,B)した反転分布領域が異なる4 アンテナ素子デバイスを作製し、変調効率の入射角依存性を測定した。測定結果を図5に示す。解析によって求めた特性と比べて一致した傾向が得られ、ピークの出る角度とそのレベルは解析結果にほぼ一致し、また入射角 $\theta = 0^\circ$ において7dBのアイソレーションをえた。これにより分極反転構造の違いによってデバイスの指向性が制御できることを実証した。導波路 B のヌル点での落ち込みが解析結果に比べて小さいが、今回用いたアンテナ電極素子では共振電極に発生する定在波が理想的な条件からずれている可能性があり、それが影響していると考えられる。マイクロ波出力を上げたり素子数を増やす事でこの値は向上できると思われる。

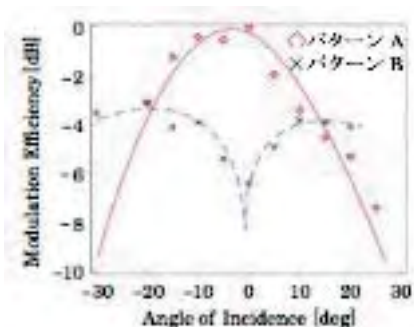


図5 4アンテナ素子デバイスの指向特性

<ブラインド信号分離>

電波通信システムの普及率増加に伴ってその動きを妨害する電波の発信位置を特定する電波監視システムの重要性が増している。このような電波監視システムにおいてブラインド信号分離技術は多くの利点をもたらす。特に独立成分分析は簡便で効果的であると期待できる。しかしながら、アレイアンテナ及びその信号処理の分野においては、独立成分分析についてまだ十分なシミュレーションや実験がおこなわれているとはいえない。そのため、独立成分分析による無線混合信号のブラインド分離に関するシミュレーション及び実験を行った[6]。

図6にブラインド信号分離の実験系を示す。実験は電波暗室内で行い、周波数が2450MHzの垂直偏波のマイクロ波を用いた。マイクロ波発信源としてYIG発振器を用いた。マイクロ波出力は発振器の出力端で測定して6dBmであった。同期検波を行うため、送信側と受信側で同一の発振出力を分配した。模擬基地局として、半波長スロットアンテナを1200mmの間隔で配置した。ベースバンド信号源には2台の2チャンネルパルスパターン発生装置を、変調方式にはQPSKを用いた。それぞれのパルス発生器は非同期に動作している。送信するマイクロ波の変調には直交変調器を用いた。模擬移動局として、半波長間隔2素子アレイアンテナを模擬基地局から600mm離して配置した。アレイアンテナの各素子は半波長スロットアンテナである。受信信号を直交検波器により同期検波した。検波信号の記録にはデジタルストレージオシロスコブを、検波信号の分離・方向推定にはシミュレーションプログラムの信号分離部及び方向推定部を用いた。

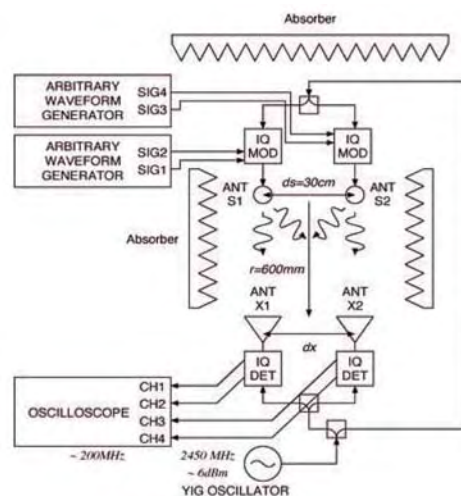


図6 ブラインド信号分離実験装置

検波した混合信号のコンスタレーションダイアグラムを図7に示す。横軸は同相チャンネルの検波電圧[mV]、縦軸は直交チャンネルの検波電圧[mV]を示す。なお、パルス幅は1ms、シンボル数は500シンボル、サンプル数は1シンボルあたり100サンプルである。検波信号では、QPSKの信号が混合されて源信号が判別できないことがわかる。

次に、デジタルストレージオシロスコブに記録したデータを計算機に読み込み、計算機上でオフラインで独立成分分析を行った。ブラインド信号分離を行った結果を第1~2源信号に対応する分離信号のコンスタレーションダイアグラムとして図8に示す。ここでは、

分離信号は測定信号の分解表現のうち第1素子の要素を示している。縦横軸はそれぞれ同相・直交チャンネルの検波電圧[mV]を示す。信号分離結果ではそれぞれQPSKの信号が判別できる程度の信号が得られた。しかしながら、互いの信号成分が残留していることも確認できる。これは、変調器や検波器の非線形性などによる変復調の歪みが原因であると考えられる。このとき、分離信号のSINRの平均は9.8dBであった。

<高密度タンパク質凝集体の計測>

無脂肪牛乳にヨーグルト菌を混入してヨーグルトを生成する過程におけるタンパク質(カゼインミセル)の凝集の様子を、光波技術を用いて実時間での計測を試みた[7]。図9に、ヨーグルト菌を加えてからのカゼインミセルの粒子径と数密度の時間変化を示す。溶液中のpHは時間とともに緩やかに低下する。なお、溶液がpH5.2とpH4.9になったときの時間も示している。カゼインミセルの粒子径は、反応が開始するときには116nmであったが、時間の経過とともに増加することがわかる。特に、pH5.2付近では、カゼインミセルの表面にホーエープロテインが付着するために、みかけの粒子径が増加する。さらに、pH4.9ではカゼインミセルの等電点に達して、カゼインミセル同士が凝集することが、粒子径が急激に増加することから確認できる。それに対して、カゼインミセルの数密度は、pH4.9まではほとんど変化しない。これはpH4.9までは、カゼインミセルの表面にホーエープロテインが付着するだけなので、カゼインミセルの数密度が変化しないためである。pH4.9に達すると、カゼインミセル同士が凝集し、数密度が急激に減少することがわかる。

最後に

様々な観点から光波、電波を利用したデバイス、システムの研究を行っている。ここでは、光波関係については、分極反転構造と3分岐導波路干渉計を用いた新しい光FSK変調器および分極反転構造電気光学変調器を用いた新しいマイクロ波受信デバイスについて述べた。構造の提案に加え、デバイスの設計・試作・動作実験を行っている。さらに、光波技術を利用した、生体やコロイドなどの多重散乱媒質内部状態の計測手法を新たに提案し、高濃度タンパク質コロイド状態の計測を示した。

また、電波関係では、独立成分分析による電波

到来方向のブラインド推定についてシミュレーション及び実験により検討し、その有効性を確認した。

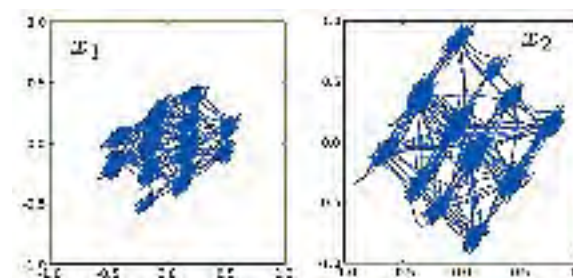


図7 混合信号の測定結果

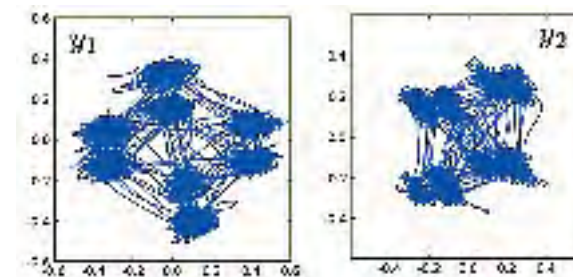


図8 ブラインド信号分離実験結果

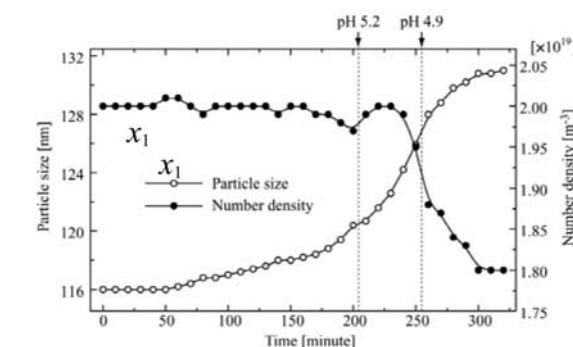


図9 カゼインミセル微粒子の粒子径と数密度の時間変化

参考文献

- [1] Hiroshi Murata and Yasuyuki Okamura, "Electrooptic Single-Sideband Modulator with Resonant Electrodes and Polarization-Reversed Structures" Jpn J.Appl.Phys. Vol. 45, No. 8B, pp. 6643-6647 (2006).
- [2] 井上, Ha Viet Pham, 村田, 坂本, 川西, 岡村: "3分岐導波路干渉計と周期分極反転構造を用いた光FSK変調器", 信学技報, OPE2008-153 (2009).
- [3] 村田, 岡村, 笹井, 榎原, "Radio-on-Fiberシステム向け26GHz帯分極反転構造電気光学SSB変調器", 電子情報通信学会論文誌C, Vol.91-C, No.1, pp.101-110 (2008).
- [4] 須田, 村田, 岡村: "分極反転構造電気光学変調器を用いたマイクロ波受信デバイス", 信学技報 OPE2008-15 (2009).
- [5] Hiroshi Murata and Yasuyuki Okamura, "Detection of an Optical Signal Using Difference Frequency Generation in a Periodically Poled LiTaO₃ Microwave Waveguide" Advances in OptoElectronics Vol.2008, Article ID 587091, 6 pages (2008).
- [6] 矢田, 塩見, 岡村, "独立成分分析によるマイクロ波混信信号のブラインド分離実験", 信学技報, MW2007-92 (2007).
- [7] 谷口, 村田, 岡村: "拡散光による高濃度タンパク質凝集体の状態評価", 2007年日本光学会年次学術講演会, K239 (2007).