

光・マイクロ波融合技術

秋山智浩* 石村栄太郎***
板倉成孝**
水間将支**

Microwave Photonics Technology

Tomohiro Akiyama, Shigetaka Itakura, Masashi Mizuma, Eitarou Ishimura

要 旨

現在、マイクロ波を用いた無線通信は、衛星通信、携帯電話、無線LAN(Local Area Network)など至るところで使用されており、今後、ミリ波帯など高周波数帯の利用による更なる大容量化や、アレーアンテナを用いたビーム制御による高機能化が進められていくと予想される。三菱電機は、無線システムを中心に研究開発が進められてきたマイクロ波技術と、光ファイバ通信を中核とするフォトンクス技術とを融合することによって、従来のマイクロ波技術の枠を超えたより高性能、高機能なマイクロ波システムの実現を目指している。

光波は周波数が100THzオーダーと、同じ電磁波であるマイクロ波の1,000倍以上であり、波長は1 μ m程度と、1,000分の1以下である。したがって、光波の高周波数性から広帯域化が、また、短波長性から小型化が期待できる。さらに、光ファイバを伝送路に利用することによって、同軸ケーブルに対して長距離伝送(伝搬損失:0.2dB/km@1.5 μ m帯)、大容量(広帯域)、軽量かつ柔軟性、無誘導性など多

くの優位性を持つ。

本稿では、このような光とマイクロ波の融合技術の適用例として、次の技術について述べる。

(1) 光制御型ビーム制御技術

アレーアンテナのビーム制御に光信号処理を適用することによって、アンテナ素子、周波数帯に依存しないビーム形成回路を開発した。

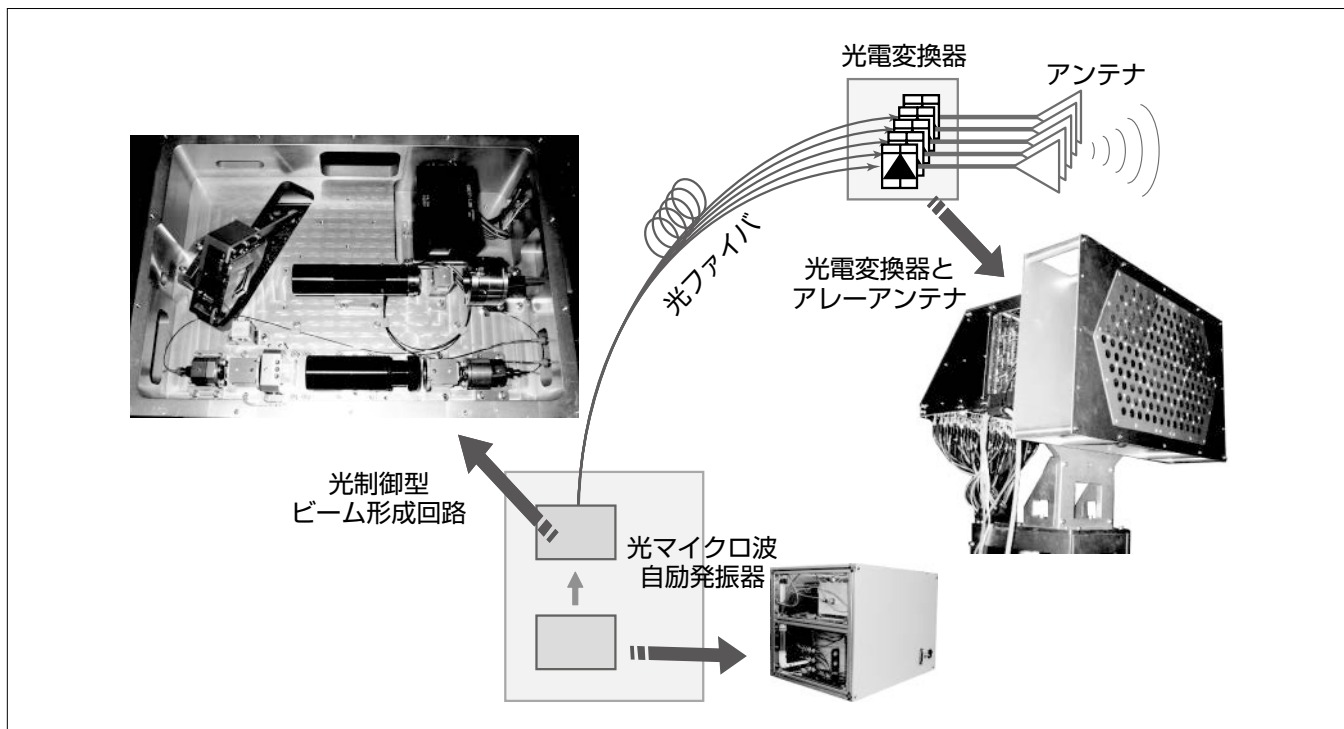
(2) 高マイクロ波出力光電変換技術

耐光入力強度に優れた光電変換モジュールによって直接>29dBm(C帯で世界最高^(注1))の出力を実現した。これによって、利得及び挿入損失を向上できるとともに、マイクロ波増幅器の削減が可能である。

(3) 光マイクロ波自励発振技術

長尺の光ファイバで帰還ループを構成することによって、超低位相雑音なマイクロ波基準発振器を開発した。

(注1) 2009年10月14日現在、当社調べ



光・マイクロ融合技術を適用した無線装置の構成例

光マイクロ波自励発振器によって、超低位相雑音なマイクロ波を発生することが可能である。光制御型ビーム形成回路は、光信号処理によってアレーアンテナへの励振信号を形成する。光マイクロ波自励発振器から出力された変調光は、光制御型ビーム形成回路によってアレーアンテナ各素子への励振分布に相当する振幅位相分布に制御され、光ファイバを介して遠方にある光電変換器でマイクロ波に変換された後、アンテナから電波として放射される。

1. ま え が き

現在、マイクロ波を用いた無線通信は、衛星通信、携帯電話、無線LANなど至るところで使用されており、今後、ミリ波帯など高周波数帯の利用による更なる大容量化や、アレーアンテナを用いたビーム制御による高機能化が進められていくと予想される。当社は、無線システムを中心に研究開発が進められてきたマイクロ波・ミリ波技術と、光ファイバ通信を中核とするフォトリソ技術とを融合することによって、様々なマイクロ波・ミリ波システムで、従来のマイクロ波技術の枠を超えた高性能、高機能化の実現を目指している。

光波は周波数が100THzオーダーと、同じ電磁波であるマイクロ波の1,000倍以上であり、波長は1 μ m程度と、1,000分の1以下である。したがって、光波をサブキャリアとして用いることによって広帯域化が期待できる。また、波長が短いことから、移相器などの部品の小型化が期待できる。さらに、光ファイバを伝送路に利用することによって、同軸ケーブルに対して長距離(伝搬損失:0.2dB/km@1.5 μ m帯)、大容量(広帯域)伝送が可能であり、軽量性、かつ可とう性、無誘導性から設置の自由度が向上するなど、多くの優位性を持つ。

本稿では、このような光とマイクロ波の融合技術の適用例として、①光制御型ビーム制御技術⁽¹⁾⁽²⁾、②高マイクロ波出力光電変換技術⁽³⁾、③光マイクロ波自励発振技術⁽⁶⁾の開発概要について述べる。

2. 光制御型ビーム制御技術

近年、無線通信システム、特に衛星通信で通信容量の大容量化に伴い、アンテナの大型化、高機能化が求められている。このような要求にアレーアンテナは適している。従来、アレーアンテナのビーム制御はマイクロ波の移相器や、デジタル信号処理によって行っていた。このため、アンテナ素子数、ビーム数の増大に伴いビーム形成回路の複雑化、大型化、質量増加、消費電力増加などが課題となる。今回、アレーアンテナから放射する電波の方向や形状を、光信号処理によって制御する光制御型ビーム形成回路を開発した⁽¹⁾。

光制御型ビーム形成回路は、光学レンズのフーリエ変換作用を利用することによって、所望のアンテナビーム形状を空間光変調器へ入力すると、瞬時にアンテナ各素子への励振信号を一括形成できるという特長がある。さらに、アレーアンテナの各素子への信号分配を空間光学系で一括して行うため、アンテナ素子数、ビーム数が増加しても回路規模は変わらない。また光周波数領域で信号を処理するため、マイクロ波の周波数に依存せず、マイクロ波帯からミリ波帯まで任意の周波数帯で適用可能である。

図1に送信用の光制御型フェーズドアレーアンテナの全

体構成を示す。マイクロ波周波数でオフセットされた信号光(周波数 f_c)とローカル光(周波数 f_L)を入力する。信号光ビームを所望のアンテナ放射パターンに空間光強度変調器で強度変調する。この信号光ビームをフーリエ変換レンズによって、空間的にフーリエ変換する。このフーリエ変換された信号光とローカル光ビームとを重ね合わせたのち、アレーアンテナの素子配置と相似形に配置された光ファイバアレーによって空間的にサンプリングする。各ファイバでサンプリングされた光はO/E(Opto-Electro)変換器で光電変換され、マイクロ波(周波数 $|f_c - f_L|$)に復調される。各O/Eで復調されたマイクロ波信号はアレーアンテナの各アンテナ素子から空間に放射される。ここで、アンテナの放射パターンは、アンテナの振幅位相分布をフーリエ変換されたものとなる。このように、空間光強度変調器で形成した強度分布を光学レンズでフーリエ変換し、アンテナから空間放射で再度フーリエ変換していることから、アンテナ放射パターンは、空間光強度変調器への入力パターンと相似形になる。なお、サンプリング用光ファイバアレーの各ファイバ長のばらつきなどの位相誤差を校正するために、ローカル光の位相分布を空間光位相変調器によって制御している。

光制御型ビーム形成回路部の試作装置の概観を図2に示す。この装置は二次元3角配列で127素子まで対応可能である。

アンテナパターンの評価での測定条件は、光波の波長1.5 μ m、マイクロ波の周波数6.2GHz、アレーアンテナは三角配列で25素子のアレーを用い、空間光強度変調器で微

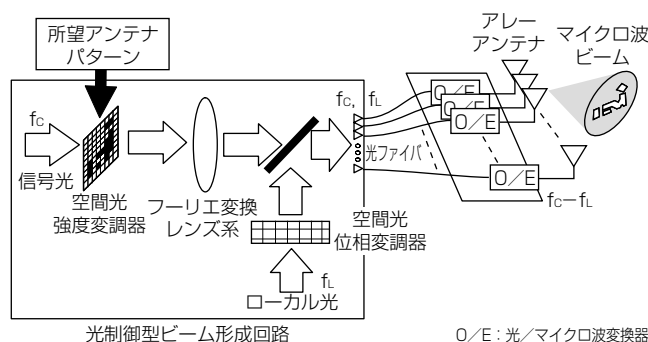


図1. 光制御型フェーズドアレーアンテナの全体構成

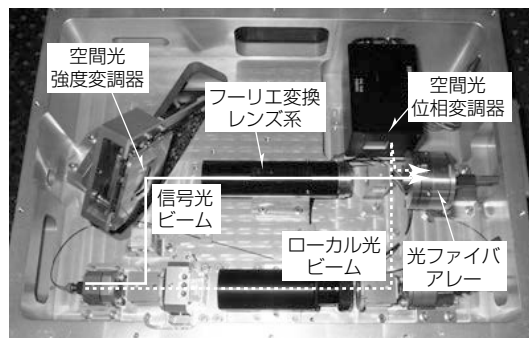


図2. 光制御型ビーム形成回路の試作装置の概観

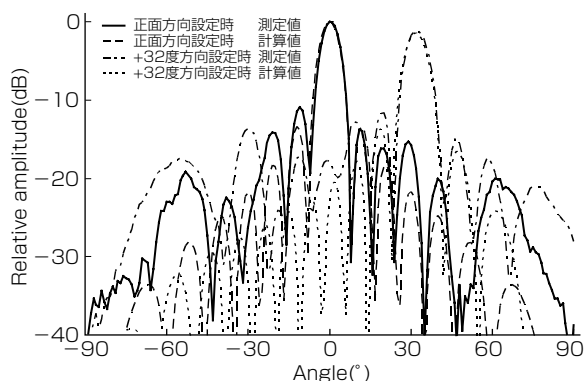


図3. アンテナ放射パターン測定例

小円形パターンを形成し、これを水平方向でシフトさせた。アンテナ放射パターンの測定結果を図3に示す。図中の各ラインは円形パターンの位置を変え、正面方向と+32度方向にビームを指定したときのアンテナ放射パターンの測定値及び計算値である。図のように、測定値は計算結果と一致しており、所望のビーム指向が得られることが確認できる⁽²⁾。

このように、光学的フーリエ変換を利用した光制御型ビーム形成回路を開発し、所望のビーム特性が得られることを示し、この技術の有効性を実証した。

3. 高マイクロ波出力光電変換技術

低損失な光ファイバを伝送路として利用するRoF (Radio on Fiber: 光ファイバ無線) 技術は、マイクロ波の長距離伝送が可能である。しかしながら、短距離伝送では、マイクロ波/光、光/マイクロ波の変換損失のため、同軸ケーブルに対して優位性の確保が困難であった。この制限要因の一つとして、受光素子の入力光強度の限界がある。表面入射型pin-PD (Photo Diode) 素子の高出力化を目的に、p側にも電子もホール(正孔)も存在しない領域(空乏層)を広げた裏面入射型pin-PD素子でマイクロ波出力25.8 dBm (周波数帯: C帯) が得られている⁽³⁾。今回、更なる高出力化を図るため、吸収層に電子が走行する領域(電子走行層)を付加したpin-PD素子を開発した⁽⁴⁾。

PDから高出力のマイクロ波を得るためには、高い光電流を流す必要があり、熱抵抗の低減などが課題となる。そのため、広い受光径を確保しつつ光吸収層を薄くする必要があるが、素子容量の増大によって周波数応答が劣化し、マイクロ波出力電力が制限されてしまう。この課題を解決するために、図4に示すような、i-InGaAs層とn-InP層の間に高速の電子のみを走行させるバンドギャップ(禁制帯幅)の大きいi-InP層(電子走行層)を挿入し、空乏層を広げて容量の低減を図った。他の基本的な構造は空乏層型pin-PD⁽³⁾とほぼ同じであり、吸収層厚0.8μm、受光径50μmφ(裏面入射型)である。また感度は0.6A/Wである。

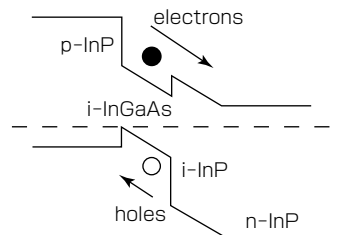


図4. 高出力pin-PDのバンド図

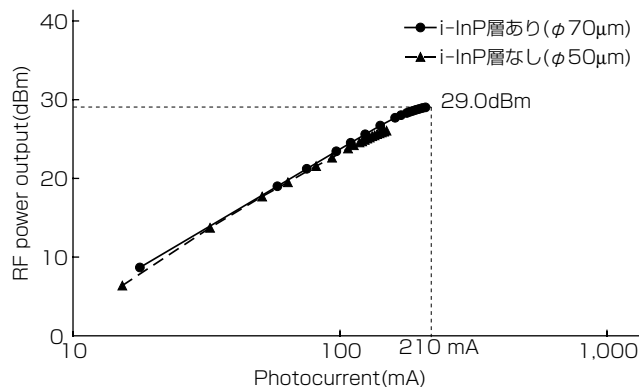


図5. マイクロ波出力電力の測定結果(周波数: C帯)

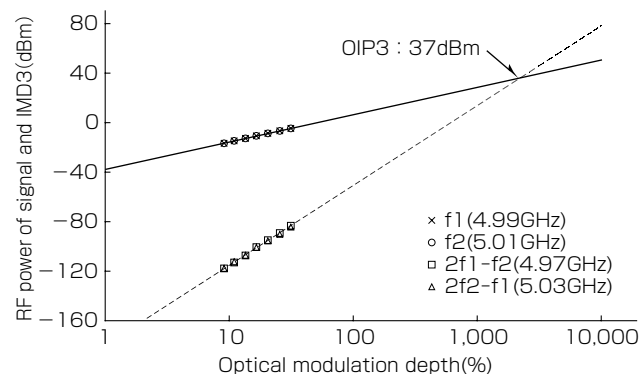


図6. 三次相互変調歪み特性の測定結果

図5にi-InP層の有無による、平均光電流に対するマイクロ波出力電力特性を示す。周波数は5.0GHz、バイアス電圧は12V、変調度100%とした。図5より、電子走行層がある場合、平均光電流210mAでマイクロ波出力29.0dBmを得た。また、周波数特性は3dB帯域10.5GHzであった。

RoFでは三次相互変調歪(ひず)み(3rd-order InterModulation Distortion: IMD3)も重要な特性である。図6に平均光電流40mAにおけるIMD3特性の測定結果を示す。信号成分とIMD3成分の交点であるOIP3(3rd-order Output Intercept Point)は37dBmと、一般的な無線通信に適用可能な特性が得られた。

このように、吸収層に電子走行層を付加したpin-PDを開発し、3dB帯域10.5GHz、マイクロ波出力29.0dBm (@5GHz)、OIP3 37.0dBmと良好な特性を得て、C帯で単素子の出力29.0dBmは、我々の知る限りで世界最高出力である。

4. 光マイクロ波自動発振技術

無線通信の高速化やマイクロ波計測の高精度化に伴い、基準マイクロ波信号源に対する低位相雑音化が求められている。一般に、発振器の低位相雑音化には帰還ループの長尺化が有効であるが、マイクロ波線路は損失が大きいため長尺化には限界がある。より低位相雑音化が期待できる発振器として、低損失な光ファイバを用いて帰還ループを構成する光マイクロ波発振器(Opto-Electro Oscillator: OEO)が提案されている⁽⁵⁾。しかしながら、光ファイバの長尺化に伴い、光ファイバ長に反比例する周波数間隔でのスプリアス発生と、周囲温度変化による光ファイバの熱伸縮に起因する発振周波数変動が課題となる。

このような課題に対し、狭帯域マイクロ波フィルタと位相ロックループ回路とを組み合わせた構成によって解決を図った⁽⁶⁾。開発した発振器の構成を図7に示す。レーザ光を光変調器で外部変調し、光ファイバ伝送後、光電変換器(PD)による直接検波によって電気信号を出力する。この電気信号を光変調器への入力とすることで帰還ループを構成できる。ここで、光変調器と光電変換器間の光ファイバを長尺化することで、出力信号の低位相雑音化を実現している。図8に開発装置による位相雑音の測定結果を示す。発振周波数はL帯とした。図8より、低位相雑音(-140dBc/Hz@離調周波数10kHz)の実現を達成した。さらに、スプリアスを抑圧するため、マイクロ波帯の狭帯域フィルタを導入した。これによって、離調周波数>100kHzに発生しているスプリアスも、抑圧されていることが確認できる(最大抑圧量45dB)。

次に、温度変動などの環境変動化でも高い周波数安定性を実現するため、光電変換された電気信号に対し、マイクロ波移相器と位相ロックループを用いて周波数安定化を図った。これによって、周囲温度10~60℃において、発振周波数変動0.3ppm以下を達成した。

5. むすび

光とマイクロ波の融合技術の適用例として、①光制御型ビーム制御技術、②高マイクロ波出力光電変換技術、③光自動マイクロ波発生技術の開発内容を述べ、それぞれの有効性を示した。

参考文献

(1) Akiyama, T., et al: Fourier transform optical beamformer employing spatial light modulator, Trans. IEICE Electron., **E90-C**, No.2 (2007)

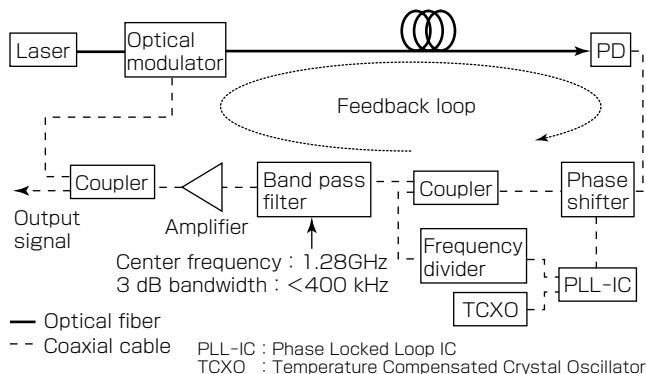


図7. 光マイクロ波自動発振器の全体構成

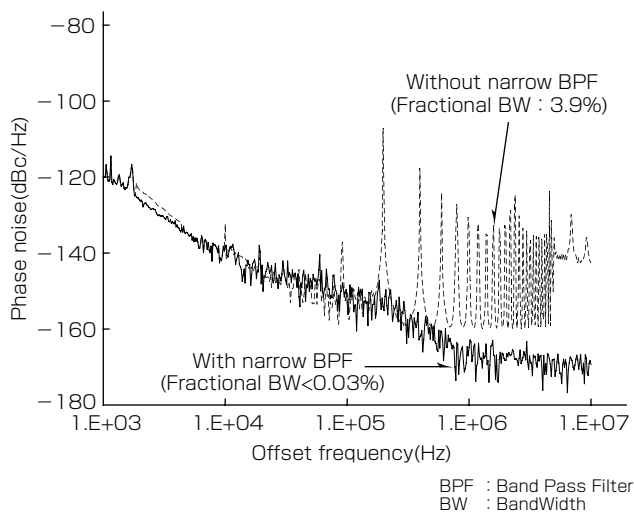


図8. 光マイクロ波自動発振器による位相雑音の測定結果 (周波数:L帯)

(2) Akiyama, T., et al: Fourier transform optically controlled phased array antenna in receiving operation, MWP2009, Fr.3.3 (2009)

(3) Sakai, K., et al: Back-illuminated high-current photodiode for analog optical links, LEOS 2008, 21st annual meeting, 288~289 (2008)

(4) Itakura, S., et al: High-current backside-illuminated InGaAs/InP p-i-n photodiode, MWP 2009, We2.6 (2009)

(5) Yao, X.S, et al: Optoelectronic oscillator for photonic systems, IEEE Journal of Quantum Electronics, **32**, No.7, 1141~1149 (1996)

(6) 水間将支, ほか: 低スプリアス・周波数高安定光マイクロ波発振器, 電子情報通信学会技術研究報告, SCE2009-2, MW2009-2 (2008)