

5-3 フォトニックアンテナとその光ファイバ無線通信システムへの応用

5-3 Photonic Antennas and its Application to Radio-over-Fiber Wireless Communication Systems

李 可人 松井敏明 井筒雅之
LI Keren, MATSUI Toshiaki, and IZUTSU Masayuki

要旨

フォトディテクターとアンテナを一体化したシステム、すなわち光給電アンテナが最近提唱され、光ファイバ無線通信システムにおけるキーデバイスとして注目を集めている。このシステムでは、マイクロ波・ミリ波をサブキャリア信号として光に変調し、変調された光キャリアは光ファイバを伝播した後、フォトディテクターで検出され、元のマイクロ波・ミリ波信号に戻される。ここで、フォトディテクターで十分なRF(Radio Frequency)パワーを検出できれば、増幅器など複雑なRF回路を必要とせず、平面アンテナと一体化し、シンプルな光給電アンテナシステムを構築できる。本研究ではUTC-PDを用いてフォトディテクション実験を行い、高いレベルのRF出力を得た(10GHzと20GHz帯域では10mW以上、38GHzと60GHz帯域では約10mWと7mW)。さらにフォトディテクターとの集積化に適する新しい共平面アンテナを開発した。フォトディテクションの実験結果に基づき、光給電アンテナの概念を提唱した。これらのデバイスを用いて、光変調、フォトディテクション、直接給電、マイクロ波放射・伝送・受信実験を行った。本論文では、これらの研究結果について報告する。

In this paper, we presented our recent works on development of photonic feeding coplanar patch antennas for microwave and millimeter-wave wireless communication system. An experiment setup for optical modulation of sub-carriers, photodetection of the sub-carrier-modulated optical wave and integration of the photodetector with a coplanar patch antenna have been described. Experimental results of optical modulation using a traveling-wave LiNbO₃ optical modulator, RF output from a photodetector: UTC-PD, and the RF output dependence on modulation index have been presented and discussed. The experiment showed that the photodetector can generate relatively large RF power at microwave and millimeter-wave frequencies, for example, more than 10mW at both 10GHz and 20GHz and around 10mW at 38GHz and 60GHz. Based on this experimental fact, we introduced a concept of direct integration of an antenna with the photodetector to realize a simple photonic feeding RF radiation unit to avoid serious transmission loss and simplify the RF system especially in high frequency wireless system. A planar antenna: coplanar patch antenna was newly proposed and designed for the direct integration with the photodetector which is of a coplanar waveguide output structure. Simulation, design, fabrication and measurement have been done for the antennas, including some new structure for broadband operation. Experiment on a hybrid integration of the photodetector and the coplanar patch antenna demonstrated a good performance of photonic microwave generating, direct feeding, transmitting and receiving. The results clearly showed the effectiveness and the potential application of our integration configuration to the future microwave and millimeter-wave wireless communication system based on the optical fiber network.

[キーワード]

高出力フォトディテクション, フォトディテクター, 光給電, 共平面アンテナ, 光無線
High output photodetection, Photodetector, Photonic feeding, Coplanar patch antenna, Radio-over-fiber

1 まえがき

現代の高速・大容量通信システムはすべて光ファイバーネットワークの上に構築されている。近年、光ファイバーを利用して電波を伝送させる光ファイバー無線システムも試されている[1]。このようなシステムは、まさに光ファイバ通信という有線システムと、電波が主体の無線システムとの融合である。光ファイバ通信は高速・大容量である。一方、移動体通信に代表されているように、電波を使った無線通信システムは、その自由な空間移動性と利便性から、ユーザに広く受け入れられ、そのため近年飛躍的な普及をみせてきた。両システムの有効な融合は、それぞれのシステムの特徴を取り入れた新しいシステムの可能性があることを意味する。電波と光の両方を使って一つの通信システムを形成していくには、それぞれの技術を用いるのはもちろんのこと、その両方を融合した技術も必要である。それが近年盛んになりつつある研究分野の一つ、いわばマイクロ波フォトニクスあるいはミリ波フォトニクスである。このような融合技術においては、マイクロ波・ミリ波のような電波を光波に載せる光変調器と、光波から再びマイクロ波を取り出すフォトディテクター(光検出器)と、さらにその電波を空間に放射する役割を果たすアンテナが重要な基本要素である。光ファイバー無線システムは、これらの要素デバイスで構成されている。

本研究の目標はこれらのデバイス、特にミリ波のような高い周波数を持つ電波を使った未来システムに有効なデバイスの研究開発にある。本研究では、まず高RF(Radio Frequency)出力が得られるフォトディテクションの実験を成功させた。そしてマイクロ波・ミリ波用の共平面アンテナの研究にも着手し、フォトディテクターとアンテナとの一体化を図り、さらに光給電アンテナの概念を提唱した。光給電アンテナは、光ファイバー無線通信システムにおけるキーデバイスとして近年注目を集めている[2][3]。このシステムでは、マイクロ波・ミリ波をサブキャリア信号として光に変調し、変調された光キャリアは光ファイバーを伝播した後、フォトディテクターで検出され、元のマイクロ波・ミリ波

信号に戻される。ここで、フォトディテクターで十分なRFパワーを検出できれば、増幅器など複雑なRF回路を必要とせず、平面アンテナと一体化し、シンプルな光給電アンテナシステムを構築できる。我々の研究ではUTC-PD(Uni-Traveling Carrier Photodiode)[4]を用いたフォトディテクション実験を行い、高いレベルのRF出力を得た。さらにフォトディテクターとの集積化に適する新しい共平面アンテナを開発した[5][6]。これらのデバイスを用いて、光変調、フォトディテクション、直接給電、マイクロ波放射・伝送・受信実験を行った。本論文では、我々が提案した光給電アンテナについて、その基本概念・理論・実験構成を述べ、これらの研究結果について報告する。

2 高出力フォトディテクション

2.1 光変調・フォトディテクション、光給電アンテナ実験系

図1に本研究に用いた実験系を示す。レーザー光は進行波型光変調器でRF信号によって変調され、光ファイバーを伝播した後、光アンプで増幅され、フォトディテクターに入力され、元のRF信号に復元される。そのRF信号が新しく開発された共平面パッチアンテナに給電し、アンテナで空間に放射される。放射された電波はホーンアンテナで受信する。

2.2 光変調

光変調はLiNbO₃進行波型光変調器で行った。図2は10GHz及び20GHzのマイクロ波信号で変調された後の光スペクトラムである。最大のRF出力を得るため、高い変調指数に調整してある。

2.3 フォトディテクション

本研究でのフォトディテクターは高いRFで動作可能なUTC-PD[4]を使用した。図2はフォトディテクションの実験結果(10GHz)を示す。この結果から、十分な光パワー(例えば13dBm)をPDに入力すれば、室内無線システムに必要な放射パワー(10dBm)の出力が得られることが分かる。さらにミリ波における実験でもほぼ同じ出力が

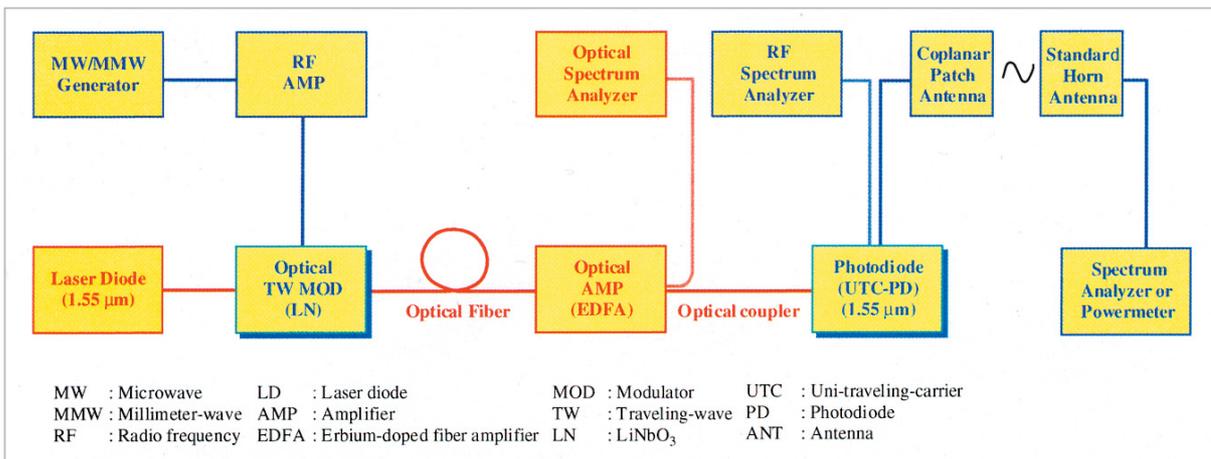


図1 光変調、フォトディテクション、光給電アンテナ及び放射・受信実験系

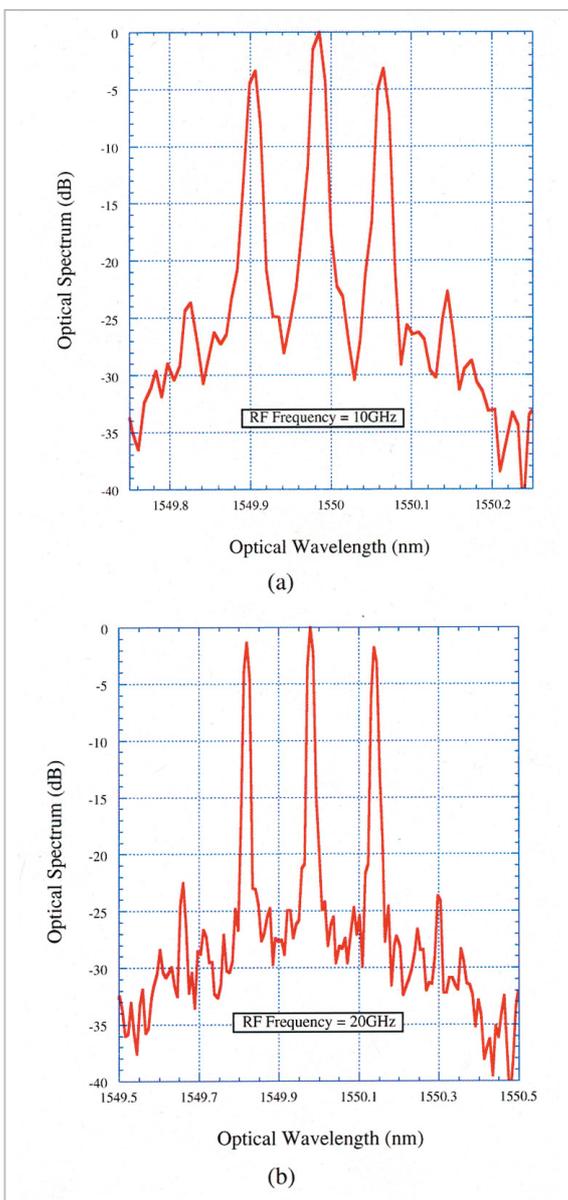


図2 変調された光波の光スペクトラム (a) 10GHzと(b) 20GHz

得られた。

上述のように、我々はUTC-PDを使い、一定の光パワーを入力して、マイクロ波及びミリ波帯域において比較的大きなRF出力を得た。この結果は、室内LANのような幾つかのシステムにおいて、十分なパワーレベルと言える。したがって、このフォトディテクターを用いて直接アンテナを給電すれば、増幅なしの、光給電アンテナを構成することができる。次章では、まずフォトディテクターと一体化するための、新たに提案した共平面アンテナについて述べる。

3 共平面パッチアンテナ (CPA: Coplanar Patch Antenna)

上記のUTC-PDは共平面導波路(CPW: Coplanar Waveguide)の出力構造を持っている。このフォトディテクターにアンテナを直接集積するためには、同じCPW給電構造を持つ平面アンテナが必要である。そのため、我々は新しい共平面パッチアンテナ(CPA)を開発した[5][6]。小型・平面アンテナとしては、マイクロストリップ線路で給電するマイクロストリップパッチアンテナ(Microstrip Patch Antenna)はよく知られているが、アクティブデバイスとの接続が容易であることなどの利点から、CPW給電の平面アンテナもよく研究されている[7][9]。我々が提案した共平面パッチアンテナは、CPWの給電構造を持ち、また、マイクロストリップパッチアンテナに類似したアンテナ特性を示すという面白い性質を持っている。本章では、共平面パッチ

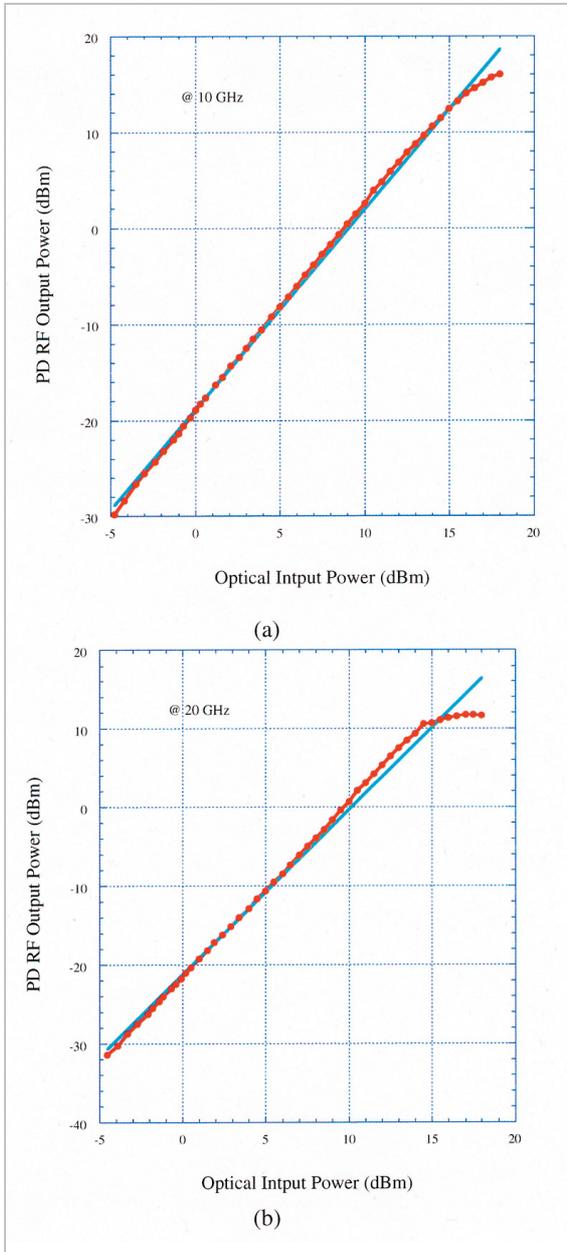


図3 フォトディテクターからのRF出力 (a) 10GHzと(b) 20GHz

チアンテナについて、アンテナ構造における電磁界分布とその動作原理を述べ、CPA 特性の理論解析及び実験結果について述べる。

3.1 共平面パッチアンテナ (CPA)

CPA は図4に示すようにCPW 給電構造を持ち、表面の共平面パッチ (CP: Coplanar Patch) が放射エレメントとなり、裏面に単一方向の放射パターンが得られるように接地導体面を設けている。このアンテナ構造は一見平面型ループスロットアンテナ (Loop Slot) に似ており、事実、

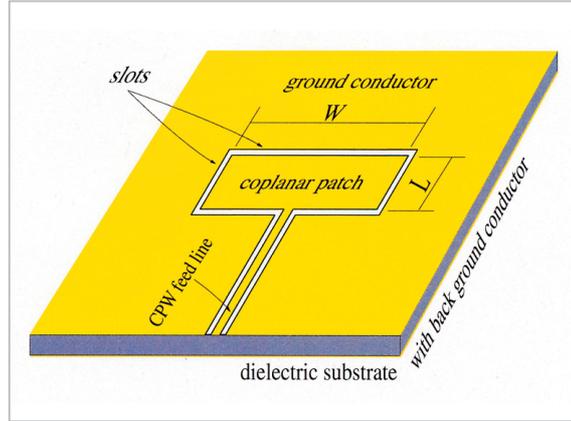


図4 共平面給電構造を有する共平面パッチアンテナ (CPA)

幾つかの論文でそう呼ばれている[8][9]。しかし、我々の電磁界シミュレーション結果により、CPAにはループスロット的概念では説明できない電磁界特性を持っていることが明らかになった。図5は10GHz帯においてパッチの長さ(L)がおおよそ導波波長の半分になった場合の電界分布を示す。シミュレーションに用いたパラメータは表1にまとめてある。パッチ上下のスロットが約1.6波長の長さになるにもかかわらず、スロットに沿った電界がほぼ均一である。この分布はいわゆるループ的な特性とは全く異なり、むしろマイクロストリップパッチアンテナに類似する。このことは、異なる寸法やパラメータのアンテナに対して行ったシミュレーション結果により確認され、実験で得られたアンテナ特性にも支持された。このような結果に基づき、我々は新たに共平面パッチ (CP) という概念を導

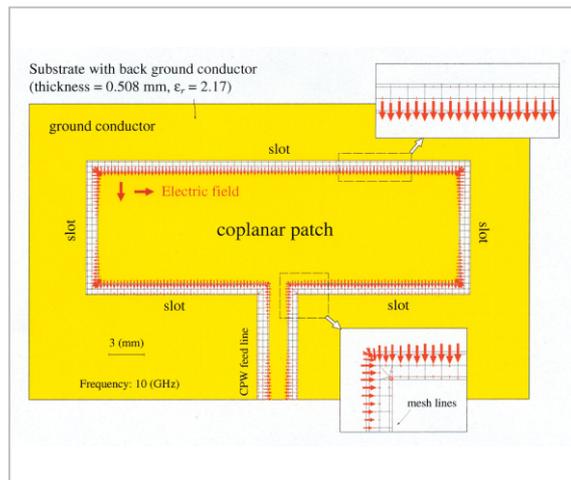


図5 共平面パッチアンテナにおける電界分布

表1 シミュレーション及び実験に用いた10GHz帯のCPAパラメーター

Dielectric substrate (DICLAD [®] 880, ARLON)	ϵ_r	$\tan \delta$ (@10GHz)	Thickness of substrate	Metal film	
	2.17	0.00085	0.508	Cu, 18 μm	
Feed line (coplanar waveguide)	<i>s-w-s</i>	L_{fed}	Unit: mm		
	1.0-1.6-1.0	10			
CPA (coplanar patch antenna)	L	W	S	---	
	9.55	31.0	1.0	---	
CPA array	L	W	S	L_{in}	
	9.55	23.0	1.0	8.5	

入し、共平面パッチアンテナ (CPA) を提唱することに至ったのである。このコンセプトの導入により CPA とマイクロストリップパッチとの類似性を明確に表すことができる。そのみならず、このコンセプトを用いれば、共平面パッチ構造を有するアンテナを設計する際に、今までマイクロストリップパッチアンテナのために開発されてきた数々の技術をそのまま流用することが可能になる。例えば、CPA の広帯域化・アレー化・円偏波化などへの展開が比較的容易になる。

3.2 解析及び実験結果

XバンドでCPAの解析及び製作・実験を行った。製作に用いた誘電体基板の比誘電率は2.17、厚さは0.508mmである。図6は中心周波数を10GHzに設計したCPAの反射特性の解析値と実測値であり、アンテナの帯域は約3.4%、マイクロストリップパッチとほぼ同じである。図7はその放射特性(解析・実測値)である。アンテナのゲインは解析で8.9dBi、実測で7.8dBiの値が得られた。実測値と理論値の差は、給電線のロスや反射損、高次モードによるものと考えられる。

3.3 2素子CPAアレー

CPAの放射パターンは特にE面においてブロードである。システムによっては、より高い指向性(又はゲイン)が要求される場合もあるので、図8に示すような2素子のCPAを設計・製作し、伝送・受信実験に用いた。アンテナの動作中心周波数は10GHz、アンテナの各パラメーターは

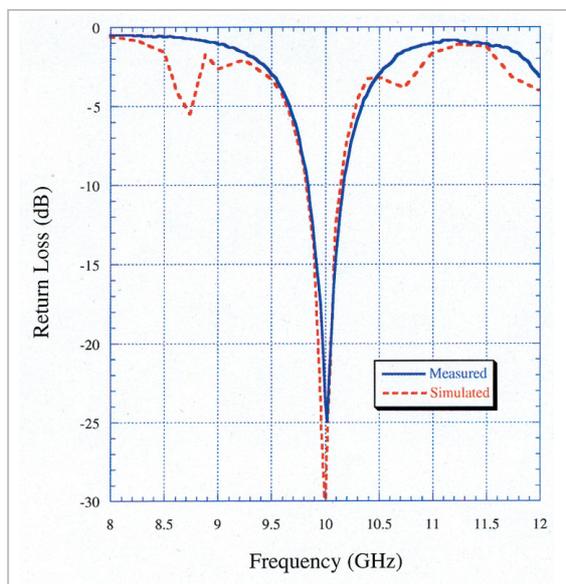


図6 CPAの反射特性

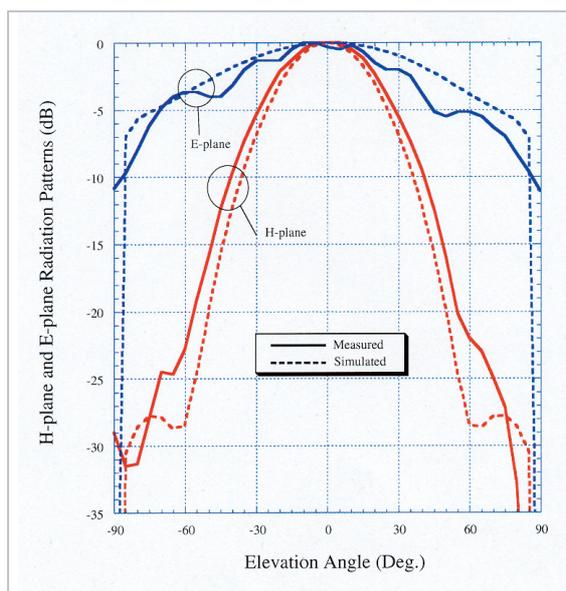


図7 放射パターン

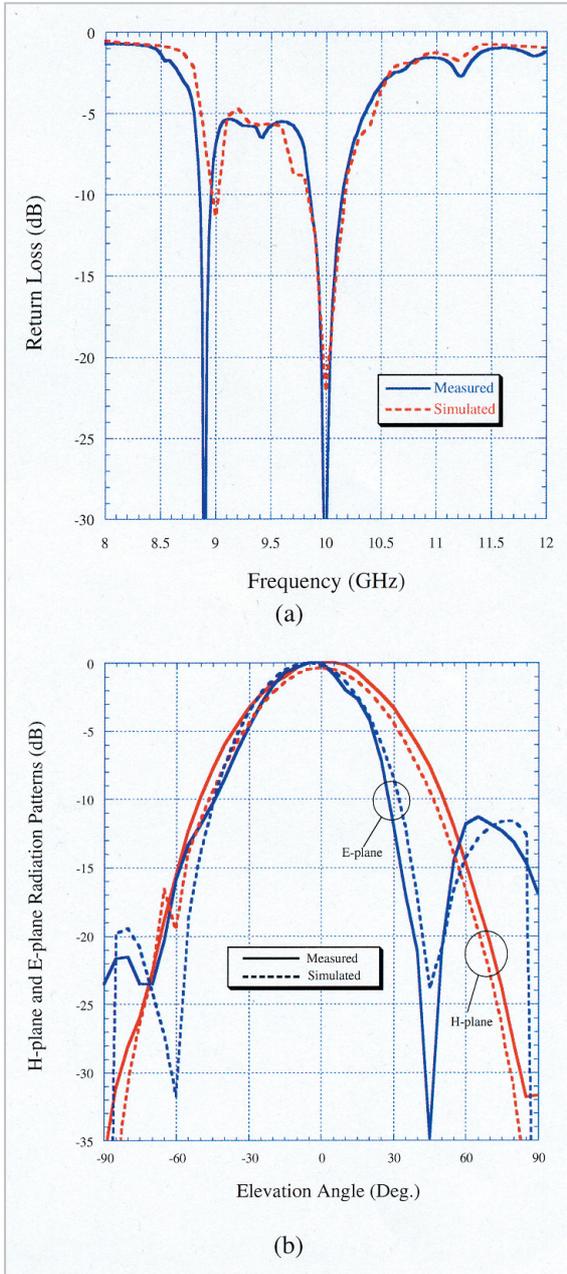


図8 CPAの(a)反射特性と(b)放射パターン

表2に示すとおりである。この2素子CPAアレーの実測ゲインは10.5dBiである。単一素子のCPAより約2.7dBのゲイン増が得られた。

4 光給電伝送・受信実験

上記のUTC-PDとCPAを用いて光給電、マイクロ波放射・伝送・受信実験を行った。受信には標準ホーンアンテナ(11dBi@10GHz)を用いた。送受信アンテナ間の距離は75cm、受信パワーはスペアナで測定した。図9はフォトディテクター

の光入力に対する受信パワーの測定値である。例えば、10dBmの光入力に対して、約-22dBmの受信パワーが得られることが分かる。このパワーレベルは、室内の無線システムにおいては十分な数値と言える。図10は変調に用いたマイクロ波の波形とPDからの出力波形の比較である。PDによる光検波の非線形性の厳密な評価ではないが、波形に明確な歪みがないことが分かる。

5 むすび

上述のように、我々は光給電アンテナの概念を提唱し、光変調・フォトディテクションの基礎実験を行い、新しい共平面パッチアンテナを提案し、PDと一体化できる光給電アンテナシステムの研究を進めてきた。基礎的な伝送・受信実験結果により、光ファイバー無線通信システムにおける光給電アンテナシステムの有効性が明らかになった。光の特長を生かし、高出力のPDを有効に利用したこの光給電アンテナシステムは従来の光ファイバー無線通信システムの複雑な構成を光ファイバー・PD・アンテナといった最もシンプルな構成に変えることができる。シンプルな構成であるゆえ、システムを低価格・高信頼性に作ることが可能である。また、余分なRF回路や増幅器を必要としないので、高

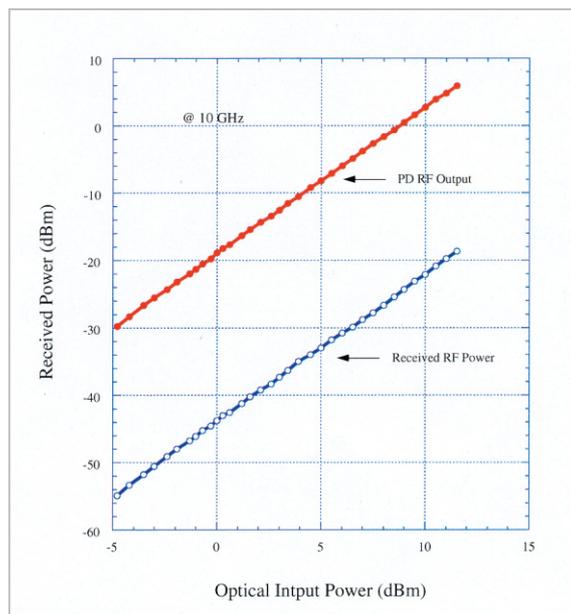


図9 PDへの光出力に対するRF出力及び受信アンテナでのパワーレベル

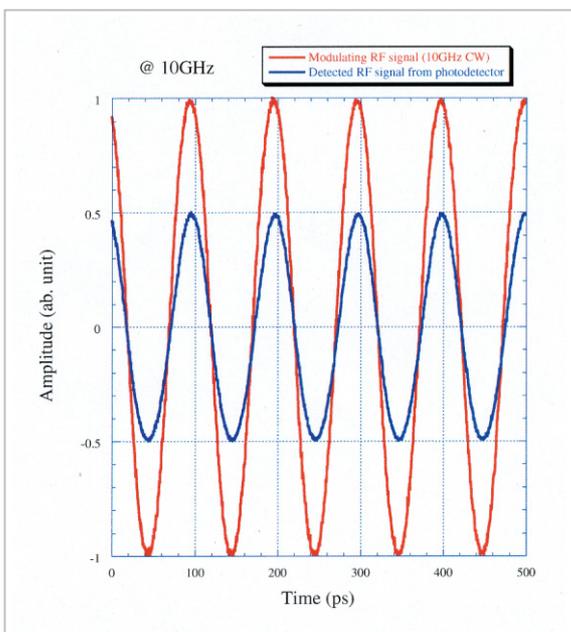


図 10 変調波の波形とフォトディテクターからのマイクロ波信号の波形

周波での損失、複雑な外部回路を省くことができる。このことは特に伝送損失が大きく、回路や増幅器などがまだ高価であるミリ波のような高い周波数の電波を用いるシステムには重要である。

謝辞

本研究を進めるに当たり、絶えず励ましを下さった板部敏和基礎先端部門長及び鈴木良昭無線通信部門長、マイクロ波・ミリ波デバイスの制作・測定全般にわたるサポートを頂いた光情報技術グループの湯建輝博士並びにミリ波デバイスグループ関係者の皆様に感謝の意を表したい。

参考文献

- 1 J. B. Geoges, et.al., IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-43, No. 9, pp. 2229-2240, Sept. 1995.
- 2 K. Li, et. al., 1999 IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting, Orlando, Florida, USA, July 11-16, 1999.
- 3 K. Li, et. al., 2001 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (MTT-S IMS2001), Vol. 1, No. TU1C-5, Phoenix, Arizona, USA, May 20-25, 2001.
- 4 T. Ishibashi, et. al., "OSA TOPS on Ultrafast Electronics and Optoelectronics", Vol. 13, pp. 83-87, 1997.
- 5 K. Li, et. al., 2001 IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting, Vol. 3, No. 73, pp. 402-405, Boston, USA, Jul. 8-13, 2001.
- 6 K. Li, et. al., 2000 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2000), Vol. 3, No. POSA1-6, Fukuoka, Japan, Aug. 21-25, 2000.
- 7 W. Menzel, et. al., IEEE Microwave and Guide letters, Vol. 1, No. 11, pp. 340-342, Nov. 1991.
- 8 B. K. Kormanyos, et. al., IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. 42, No. 4, pp. 541-545, Apr. 1994.
- 9 H-C. Liu, et. al., IEEE Trans. Antennas and Propagat., Vol. 43, No. 10, pp. 1143-1148, Oct. 1995.



李 可人 (Li Keren)

無線通信部門ミリ波デバイスグループ
主任研究員 工学博士
光通信、マイクロ波フォトニクス、マ
イクロ波工学、アンテナ

松井敏明

無線通信部門ミリ波デバイスグループ
リーダー
高周波精密計測、ミリ波要素技術



井筒雅之

上席研究員 工学博士
高速光変調技術の開発