

平成21年 5月28日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18360180

研究課題名（和文） 光信号処理に基づく超広帯域無線技術の開発

研究課題名（英文） Development of Ultra-WideBand Radio technology based on optical signal processing

研究代表者

埴 雅典 (HANAWA MASANORI)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：90273036

研究成果の概要：本課題では、光信号処理技術を用いて3.1GHzから10.6GHzの7.5GHzの帯域幅を占有する超広帯域インパルス無線信号を生成する方法について研究した。低ジッタの小型パルス光源、標本化ファイバブラッグ回折格子を用いた光信号処理、バランス型光検出器による光電変換、超広帯域アンテナと組み合わせることで、米国連邦通信委員会の定める電力制限に完全に適合した超広帯域インパルス無線信号を生成することを可能にした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
18年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
19年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
20年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：光信号処理，超広帯域無線技術，光ファイバデバイス

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：超広帯域インパルス無線，パルスレーザ，無線伝送システム，光信号処理，標本化FBG，超広帯域アンテナ，利得スイッチ型パルスレーザ

1. 研究開始当初の背景

無線システムの分野では、超広帯域(Ultra Wide Band: UWB)無線システムが大きな期待を集めていた。UWBシステムでは、米FCC(Federal Communication Council)の規定では3.1GHz～10.6GHzの利用が認められており、その広大な帯域幅故に、従来の無線システムに比べ、高速伝送、高パス分解能、高耐干渉性、高時間遅延分解能等々、非常に多くの利点を有している。

UWB無線システムの実装方式の一つにインパルス状のパルスを用いるUWB-インパ

ルス無線(Impulse Radio: IR)方式がある。UWB-IR方式はパルス幅が数百ピコ秒で帯域幅が数GHzにわたるパルス(以後UWB-IRパルスと表す)を直接送受信することが特徴である。しかしUWB-IRパルスは極めて細かいパルス幅と広大な帯域幅ゆえに生成が困難であり、UWB-IRパルスをその形状まで正確に制御して自由自在に生成する技術はUWBシステムの実現にとって重要な研究課題である。この課題を解決するべく、光処理でUWB信号生成を行う方法がいくつか提案されていた[例えば1,2]。

- [1] Jun-Yu Chen, Yuan-Ching Chen and Wen-Piao Lin, 'Generation of Optical-Based Impulse Radio Signal for Ultra-Wideband Wireless Systems,' Technical Digest of 10th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2005), 7P-005, 2005-07.
- [2] 埜 雅典, 中村 一彦, '光信号処理による UWB-IR パルスの生成,' 2005 年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, A-5-18, 2005-09.

一方、我々は他に類を見ない高度な標本化ファイバブラッググレーティング(FBG)作製技術を有しており、様々な分野へ応用すべく研究を行っていた。例えば、平成17年度科学研究費助成・萌芽研究には、標本化FBGを用いて高速光信号のウェーブレット解析を実現することを目的とした研究課題で応募して、採択されている(課題番号:17656131)。この研究課題は非常に高度なFBG作製技術を必要とするため、これまでに、この研究課題を遂行しつつ、高度な光FBGの作製技術を開発した。この高度な標本化FBG作製技術を応用することで、上記文献[2]に記されているように、非常に高精度にUWB-IRパルスの波形整形が可能になっている。

上記文献[2]では、我々の有する標本化FBG作製技術を応用することで、これを用いた光信号処理により、50G sample/secを超える超高速の標本化処理により任意形状のUWB-IRパルスを自在に生成可能であることを報告している。このデバイスはコンパクト(~数センチメートル)で低コストであるため、実用化にも適している。このように、本研究は、光処理で超広帯域無線システム用信号生成を行う流れが世界的に生まれつつある中で群を抜いて進んでおり、さらに今後の発展の可能性を大いに秘めていると考えている。

2. 研究の目的

本研究は、標本化FBGをベースにした光信号処理技術を用いることで、電気回路技術では実現が困難な超広帯域の無線システムを安価に実現することが当面の目的であった。将来的には距離分解数ミリメートル程度の超高精細地中イメージングシステムの開発につなげ、世界各地で深刻な問題である地雷除去に貢献することが最終的な目的である。

本研究課題では、上記の目的に対して、信号処理用標本化FBG、超広帯域アンテナ、小型光源などの要素技術(下図中の赤文

字部分)の開発を行うことを第1の目的とし、さらに各要素を組み合わせ、超広帯域無線システムの送受信実験を行うことを第2の目的とした。

3. 研究の方法

研究計画一年目(平成18年度)

研究計画初年度は主として要素技術(低ジッタ小型利得スイッチ型パルスレーザモジュール、光信号処理によるUWBパルス波形生成方式、標本化ファイバグレーティングのロバスト設計法)の研究を行った。

高知工科大学・野中により、低ジッタ小型利得スイッチ型パルスレーザモジュール、が開発された。開発されたパルスレーザモジュール(図1)は、アイソレータを内蔵しない分布帰還型半導体レーザダイオード、偏光保持型ファイバ遅延線、ダイヤモンドライクカーボンを端面にコーティングした部分反射型光コネクタ、戻り光防止用偏光保持型アイソレータ、からなる。

山梨大学・埜は、光信号処理に基づくUWBパルス生成方式として、標本化ファイバブラッググレーティングを用いた光信号処理によって任意形状のUWBパルス整形を行う方法(方式①)と、光スプリッタ・光遅延線・バランス型光検出器を組み合わせた光-電気ハイブリッド信号処理によってガウシアンモノサイクル形状のUWBパルス生成を行う方式(方式②:図2)について検討した。また、山梨大学・大木はUWBパルス整形用標本化ファイバブラッググレーティングの実装に当たり、FBG作成時の実現誤差の影響を低減可能なロバスト設計法についても検討を行った。

研究計画二年目(平成19年度)

まず、上述した二つのUWB-IRパルス生成方式を比較・検討し、以後方式②を中心に検討を進めることとした。標本化ファイバブラッググレーティングの作製技術の向上により、タップ数4以上の様々な光トランスバーサルフィルタを自在に作成できる環境を整え、様々な光信号処理に適用可能である

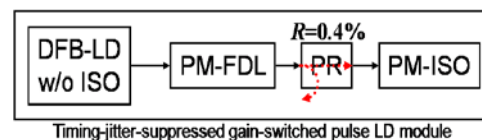


図1: 低ジッタ小型利得スイッチ型パルスレーザダイオードモジュールの構成。DFB-LD: 分布帰還型レーザダイオード。ISO: 光アイソレータ。PM-FDL: 偏光保持型ファイバ遅延線。PR: 部分反射器。PM-ISO: 偏光保持型アイソレータ。

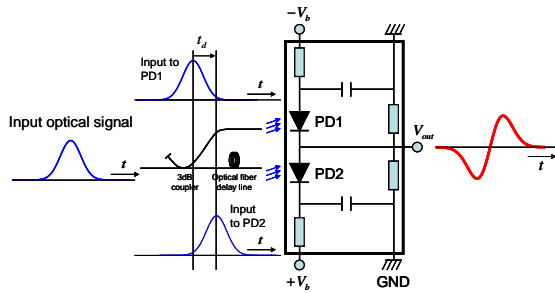


図 2：電気・光ハイブリッド処理によるガウシアンモノサイクルパルス生成方式

ことを示したが、光搬送波の偏光状態および位相状態の変動により、方式①ファイバ型マッハ干渉計として構成したシステムでは安定した UWB-IR パルスを得ることができず、容易に安定した UWB-IR パルスが得られる方式②を中心に研究を続けることとしたものである。

埼玉工業大学・松井は、超広帯域アンテナとして、テーパードスロットアンテナ (TSA : 図 3) を設計・開発した。この TSA は FCC の定める 3.1GHz~10.6GHz のスペクトルマスクをカバーし、比較的高い指向性とアンテナ利得を有するため、特にパルスレーダへの応用に適している。

山梨大学・中村は、上述したパルスレーザモジュールより出力される極短光パルスを光電変換して得られる広帯域電気パルスを信号源として 3 アンテナ法により広帯域アンテナのアンテナ利得特性を求める手法を開発すると共に、電磁波の空間伝搬損失を表す Friis の式を適用して、UWB システムのスペクトルマスク適合評価に用いられる等価等方放射電力 (Equivalent Isotropic Radiated Power: 以下 EIRP) を推定する手法を開発した。これを用いることで、構築した UWB-IR テストベッドから放射される UWB-IR パルスの FCC スペクトルマスクへの適合評価を行った。

山梨大学・埜は、短光パルスを光源とする特徴を活かし、光ファイバを介した UWB-IR 信号の遠距離配信の検討も行った。このテストベッドを用いて UWB-IR 無線送

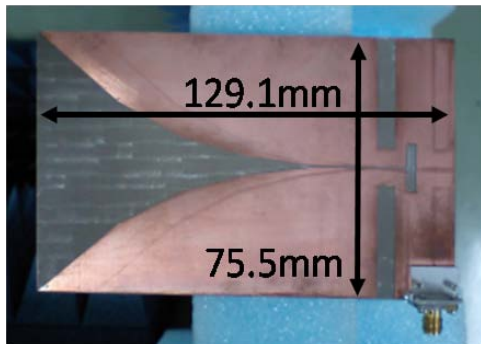


図 3：超広帯域 Tapered Slot Antenna

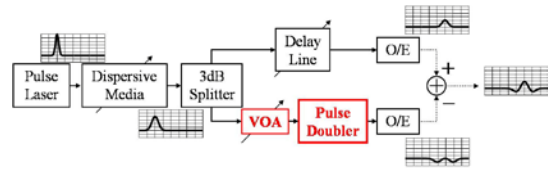


図 4：光 - 電気ハイブリッド信号処理による変形ガウシアンダブルレットパルス生成系

受信実験を行い、数十センチメートルではあるが、UWB-IR 信号のエラーフリー伝送を実現した。

研究計画三年目 (平成 20 年度)

山梨大学・埜は、UWB-IR パルス生成方式として、米国連邦通信委員会 (US-FCC) が定めた 3.1GHz~10.6GHz の UWB 帯域において、特に GPS 帯におけるスペクトルの適合度の向上を目指した光 - 電気ハイブリッド信号処理方式について検討した。短光パルス源、ファイバコプラ、光サーキュレータ、ファイバグレーティング型パルスダブラ、可変光減衰器、バランス型光検出器を用いたパルス整形回路によって、GPS 帯に深いノッチを持つ、変形ガウシアンダブルレットパルス生成方式 (図 4) を開発した。この方法で生成する変形ダブルレットパルスは、光領域の簡単な調整によって、任意の周波数帯域に深いノッチを与えることができ、このノッチを、放射電力が厳しく制限されている GPS 帯 (0.96GHz~1.61GHz) に設けることで、アンテナ放射後の EIRP のスペクトルマスクへの適合度を向上させることができる。

埼玉工業大学・松井は、UWB 帯域をカバーする TSA にスロットラインによる低域通過フィルタを装加した帯域通過 TSA (図 5) を開発した。研究計画二年目に開発した TSA は 3GHz 以上の高周波成分をほぼ等しく放射するものであったのに対し、この帯域通過 TSA は、10.6GHz 以上を減衰させるスロットライン型低域通過フィルタを備えており、これを用いて UWB-IR パルスを放射することにより、スペクトルマスクへの適合度が向上する。

また、山梨大学・埜は、これまでに開発した短パルス光源、光-電気ハイブリッド信

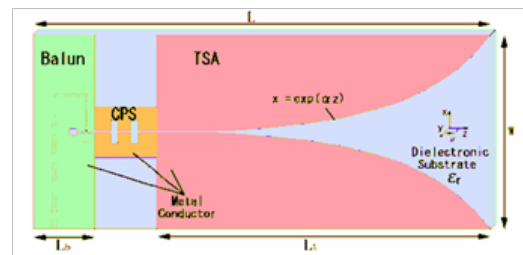


図 5：帯域通過 TSA の構成。図中 CPS と表記されている部分がスロットライン型低域通過フィルタ。

号処理による変形ガウシアンダブレットパルスパルス生成方式，帯域通過 TSA 他を組み合わせて，FCC スペクトルマスクに完全に適合する UWB-IR 伝送試験用テストベッドを構築し，短光パルスを光源とする特徴を活かして光ファイバを介した遠距離配信実験を行った。

4. 研究成果

研究計画一年目（平成18年度）

高知工科大学・野中が開発した低ジッタ小型利得スイッチ型パルスレーザモジュールによって生成された短光パルスの観測例を図6に示す。繰り返し周波数が1.0GHz～2.4GHz、パルス半値全幅40ps、タイミングジッタが2ps以下でのパルス発振が可能であることを確認した。

山梨大学・埴は，図6の短光パルスを光源として，光-電気ハイブリッド信号処理によって電気ガウシアンモノサイクルパルスを生成した。結果を図7に示す。図7より，生成されたガウシアンモノサイクルパルスに一切のリングングが付随していないことが見て取れる。これが，光信号処理でUWB-IRパルス生成を行う最大の利点であり，特に地雷探査等のパルスレーダへの適用において重要となる。この図より研究開始当初の目的が十分に達せられていること

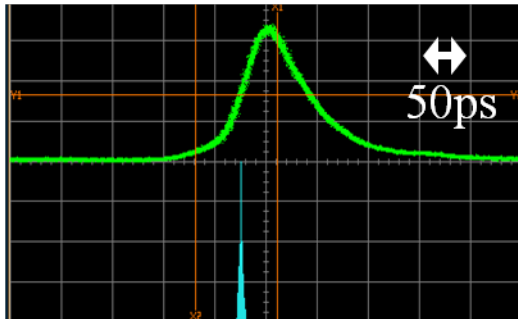


図6：低ジッタ利得スイッチ型パルスレーザダイオードモジュールより出力された短光パルス。水色は半値ヒストグラム。

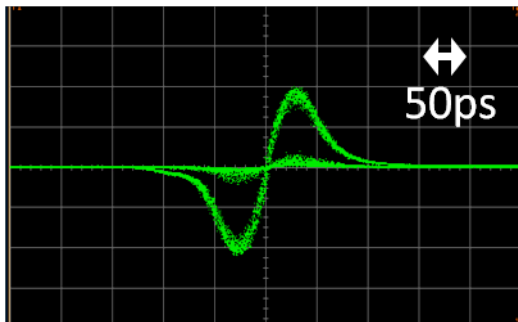


図7：生成された1.0GHz繰り返しの電気ガウシアンモノサイクルパルス。伝送速度1.0Gbit/sのオンオフ変調後の波形。

が確認できる。

この時のパルス繰り返し周波数は1.0GHzであり，無線伝送後のビット誤り率を評価するために1.0Gbit/sのオンオフキーイング変調を施してある。オンオフキーイング変調は，ガウシアンモノサイクルパルスの整形を行う前に，光領域でMach-Zehnder強度変調器を用いて行ったが，この際，変調器の V_{π} 特性に比して変調器用ドライバアンプの出力電圧が小さかったために，若干のオンオフ比の劣化が見られる。しかし，上下に二つ存在するパルスのいずれをみても，アイ開口は十分に開いていることも確認できる。

このように，研究計画一年目の成果として，繰り返し周波数が1.0GHz～2.4GHz、パルス幅が224ps～444ps、タイミングジッタが6ps以下の非常に高精度な電気UWBパルスを生成する技術を確立した。

研究計画二年目（平成19年度）

埼玉工業大学・松井が開発したTSAの電圧定在波比(VSWR)特性と放射指向特性を図8に示す。VSWR特性は，3.1GHz～10.6GHzのUWB帯域において概ね2以下を保っており，すぐれた広帯域性を有していることが分かる。また，放射指向特性は3GHzで約±50度，10GHzで約±20度の強い指向性を有しており，最終目的であるパルスレーダ応用に適した広帯域アンテナが実現できていることが確認できる。

山梨大学・埴，中村は，電波暗室内で対向させたTSA対と，研究計画一年目に開発した光-電気ハイブリッド信号処理を用いた電気OOK-UWB-IR信号生成系を組み合わせ，超広帯域無線伝送テストベッドを構築した。こ

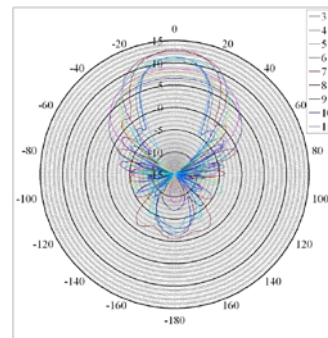
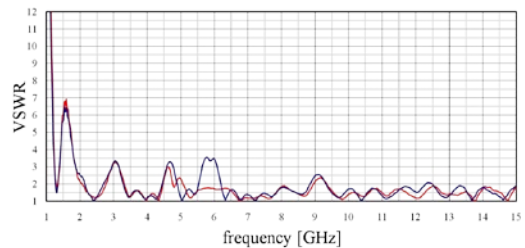


図8：TSAのVSWR特性(上)と放射指向特性(下)

のテストベッドでは、短光パルス光源とする特徴を活かせば、光ファイバを介した遠距離配信も実現可能である。

このテストベッドを用いて、実際に無線伝送試験を行った。この時、空間中の電波伝搬損失が高周波になるほど大きくなることを考慮して、送受信アンテナ間距離は 20cm とした。アンテナの群遅延特性の影響を受けるために、受信パルスには強いリングングが生じるものの、十分な受信電力が得られる場合には、エラーフロアが発生することなく、エラーフリー伝送が行えることを確認した。

山梨大学・中村が開発した手法を用いて推定した、TSA から放射された UWB-IR 信号の推定 EIRP スペクトルを図 9 に示す。比較のために、パルスの繰り返し周波数を 128MHz、256MHz、512MHz とした 3 例を FCC のインドアスペクトルマスクと併せて示してある。

図から明らかなように、特に GPS 帯域においてマスクへの適合度が低いことが確認できる。さらに繰り返し周波数が 512MHz と高い場合には、スペクトルの離散成分(図中の縦線)の間隔が広がることによって、帯域の有効利用ができなくなっていること、逆に繰り返し周波数が低い 128MHz では、高周波成分が減衰してしまっており、UWB システムの最大の特徴である広帯域性が生かされていないこと、などが確認できる。

研究計画二年目の成果は、広帯域 TSA を用いた UWB-IR 信号の無線伝送特性評価用テストベッドを構築し、エラーフリー無線伝送を実現したことである。その一方で、①スペクトルマスクへの適合度を向上させる方策が必要、②高速無線データ伝送へ応用するには、

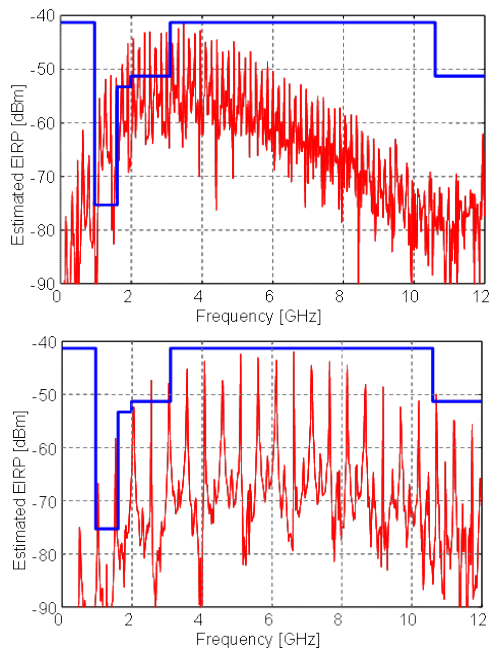


図 9 : 推定 EIRP スペクトル。上から 128MHz, 512MHz 繰り返し時。

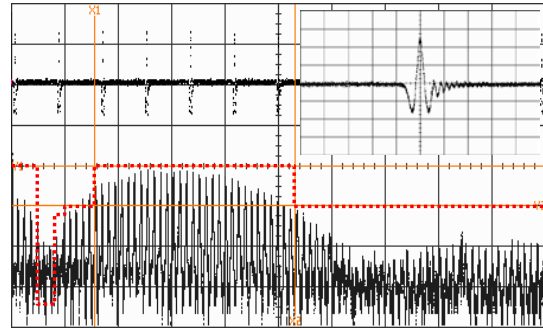


図 10:生成された変形ガウシアンダブルレットパルスとその RF スペクトル

スペクトルの離散成分を抑圧する方策が必要、③パルスレーダへの応用ではスペクトル密度があげられる低繰り返し周波数が望ましいが、低繰り返し周波数でも広帯域性を維持できる方策が必要、という課題が明らかになった。

研究計画三年目(平成20年度)

研究計画最終年度となる平成 20 年度は、上述した 3 つの課題のうち、主として①、③について、山梨大学・埜と、埼玉工業大学・松井が連携して検討を行った。

山梨大学・埜が開発した方式によって生成した変形ガウシアンダブルレットパルスのパルス波形と、RF スペクトルを図 10 に示す。比較のために、FCC のインドアスペクトルマスクが赤線で示されている。図から明らかなように、変形ガウシアンダブルレットパルスは GPS 帯に強いノッチを有するため、スペクトルマスクへの適合度が大幅に向上することがわかる。差し込み図として示されているパルス波形にリングングが見られるが、これは実験に使用した同軸ケーブルの曲り部分での反射によるもので、開発した生成方式に起因するものではないことが分かっている。

埼玉工業大学・松井が開発した帯域通過 TSA の利得特性を図 11 に実線で示す。比較のために、通常の TSA の利得特性も点線で示している。図から明らかなように、帯域通過 TSA では 10GHz 以上で伝達特性が低下し、10.6GHz では通過域のピークに比べて 6dB の抑圧比を有していることが分かる。

これらを UWB-IR 信号の無線伝送テストベッドに組み込んで得た推定 EIRP スペクトルを図 12 に示す。この時はパルスレーダへの応用を念頭に置いて繰り返し周波数を 67MHz としたが、4GHz から 10GHz の離散スペクトル成分がほぼ等しい高さを有しており、スペクトルマスクへの適合度、広帯域性、低繰り返し周波数への対応、何れも満足のできるパルス生成が可能になったことを確認した。

三年間の研究成果は、光信号処理技術を活用した UWB-IR 信号生成と広帯域 TSA の利用

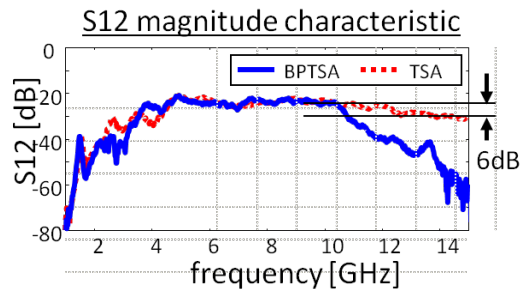


図 11: TSA と帯域通過 TSA の伝達特性

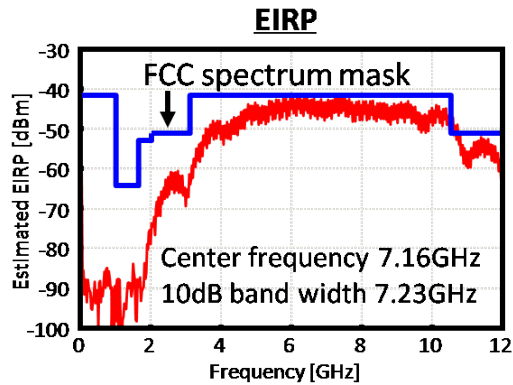


図 12:最終的に得た推定 EIRP スペクトル

により、実用レベルの高品質な UWB-IR パルスが生成できるようになったことである。特に光信号処理技術の有効性が明らかにできたことにより、研究開始当初に予定していた以上に高品質な UWB-IR 信号を生成できるようになったため、地雷探査レーダのみならず、人体組織探査レーダや光ファイバ配信など様々な応用が開けた。今後の展開が大いに期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- [1] Koji Nonaka 他5名中4番目, 'Polarization fluctuation suppression and sensitivity enhancement of an optical correlation sensing system,' *IoP Meas. Sci. Technol.*, 査読有, Vol.18, pp.3230-3234, 2007.

[学会発表] (下記他 27 件・合計 29 件)

- [2] M. Hanawa 他4名中1番目, 'Dispersion tolerant UWB-IR-over-Fiber Transmission under FCC indoor spectrum mask,' *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2009, OTuJ3*, 2009年3月24日, San Diego.
- [3] M. Hanawa 他3名中1番目, 'An Experimental Demonstration of UWB-IR-over-Fiber system,' *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2008, OThD5*, 2008年2月27日, San Diego.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

埴 雅典 (HANAWA MASANORI)
山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授
研究者番号: 90273036

(2) 研究分担者

野中 弘二 (NONAKA KOJI)
高知工科大学・工学部・教授
研究者番号: 70330777

松井 章典 (MATSUI AKINORI)
埼玉工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 20255144

(3) 連携研究者

大木 真 (OHKI MAKOTO)
山梨大学・大学院医学工学総合研究部・教授
研究者番号: 50211785

中村 一彦 (NAKAMURA KAZUHIKO)
山梨大学・大学院医学工学総合研究部・助教
研究者番号: 40402086