

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：17701

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23860040

研究課題名（和文） IP系光ファイバ無線システムの研究

研究課題名（英文） Radio-on-Fiber System Compatible with IP network

研究代表者

福島 誠治 (FUKUSHIMA SEIJI)

鹿児島大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：10610214

研究成果の概要（和文）：高周波（アナログ）とIP（デジタル）の両信号を多重化した副搬送波多重光として、光ファイバ中を伝送するシステムについて、理論的及び実験的研究を実施した。デモシステムとして、鹿児島大学で遂行中の大学人工衛星の衛星地球局を想定し、複数周波数（400MHz～13GHz）の高周波信号とデジタル信号のそれぞれを最適の方法で変調し、かつ多重化する技術を提案した。実システム適用の重要性を鑑み、連携研究者開発の光変調器内蔵レーザー（EML）をモデル化し、提案システムへの適用性を示した。

研究成果の概要（英文）：We performed theoretical and experimental study on a subcarrier-multiplexed radio-on-fiber system that carries both analog radio and digital IP signals simultaneously. Taking an earth station of a Kagoshima University cube satellite, KSAT, as a demonstrator example, we proposed a technique that carries plural radio-frequency signal of 400 MHz to 13 GHz and digital signal, each of which is optimized for modulation and multiplication. We modeled an electro-absorption-modulator integrated laser, provided by collaborators, and applied it to a real demonstration system successfully.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：工学

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：光副搬送波、光ファイバ、光伝送、レーザーダイオード、人工衛星

## 1. 研究開始当初の背景

光ファイバを使用したネットワーク（幹線～アクセス）の展開及び高ビットレート化は順調に進展していた。同時に高周波信号を光ファイバで伝送するRoF（Radio-on-Fiber）システムの研究開発も盛んであった。しかし

ながら、両者を多重化し、一つのシステムとして運用し、経済性・効率性を実現する機運は十分とは言えなかった。また、アクセス系とホームネットワークの融合も進んでいなかった。

## 2. 研究の目的

高周波信号とデジタル信号を1本の光ファイバで伝送可能にするシステムを提案し、実験実証することを目的とする。具体的には(1)必要な変復調・符号化復号化の提案、(2)必要な多重システムの提案、(3)必要な光デバイスの評価とモデル化、(4)プロトタイプ的なデモシステムの構築を行うこととした。

本研究で実現した技術を鹿児島大学で実施中の大学人工衛星プロジェクト「KSAT (ハヤト)」の衛星地球局に適用する。

## 3. 研究の方法

### (1) システム構成の提案

学生などを交えた KJ 法によるブレインストーミングを実施し、高周波とデジタル信号を多重化し光ファイバ伝送するシステムをできるだけ多く提案する。提案された方式をいくつかの性能指数(帯域、部品の仕様、電波法令適合性など)の比較を行う。

提案された方式のうち実現可能性が高いものに対して、必要なシミュレーションを行うことで原理確認する。この時期に発明を整理し、特許(案)として出願する。

### (2) 実験実証

研究フェーズにある最先端デバイス(光変調器内蔵レーザ(EML)などのレーザ光源)の評価とモデル化を行う。

上記(1)のうち仮定が多く含まれるシミュレーションに研究フェーズにある最先端デバイスのパラメータを代入し、ポテンシャルを再度確認する。性能確認と並行して、デモ実験の準備を進める。本研究プロジェクト内で可能な範囲で、研究開発した技術を鹿児島大学で実施中の大学人工衛星プロジェクト「KSAT (ハヤト)」の衛星地球局に適用する。

## 4. 研究成果

### (1) デジタル RoF システムの提案

高周波信号を RoF システムで伝送する方式として、デジタル RoF や従来のアナログ RoF や中間的なハイブリッド RoF などの手段がある。本研究は従来のアナログ RoF は対象としないので、まずデジタル RoF 及びハイブリッド RoF システムを提案し、これらの優劣比較を行った。

本研究における提案は大分類として3種類である。①高周波信号を A/D 変換によって IP 化し、他のデータの IP と一緒に時分割多重(TDM)によって伝送するデジタル RoF (研究計画調書記載のため図省略)。②光副搬送波において、データと高周波を異なる副搬送波周波数に割り当てる周波数分割多重(FDM)によって伝送するハイブリッド RoF のうち周波数変換を伴わないもの(タイプ1)(図2)。

③ 光副搬送波において、データと高周波を異なる副搬送波周波数に割り当てる周波数分割多重によって伝送するハイブリッド RoF のうち、高周波の周波数変換を伴うもの(タイプ2)(図3)。

電波法令に定められたスプリアス放射の規定(例えば-70dB)を①案のデジタル RoF で実現するには、電界に対して12bit以上の量子化が必要である。量子化をByte単位に切り上げれば、わずか10MHzの高周波信号をIP化して伝送するためには、ヘッダを含まずに320Mb/sの帯域を消費する。中間周波(IF)を用いる手段やトリガーのみを伝送する手段を検討したが、ほとんどの場合に重大な問題が発生することが分かった。

一方、図1に示されるEMLと呼ばれる光変調器内蔵レーザの研究開発成果を活用すれば、②、③案は非常に現実的かつパワフルなソリューションでありうる。EMLは半導体における電圧依存光吸収に基づく光変調器(EAM)とDFB-LDをモノリシック集積したデバイスである。一般にはDFB-LDをCW発振させ、光変調器にて強度などの変調を行う。本研究において、EMLは光変調器だけでなく、DFB-LDにおいても数GHz程度までの変調が十分に可能であることを見出した。さらに、光変調器をフォトダイオード(PD)として使用することも確認した。EMLモジュールとして、複数の高周波端子が必要であること、また通常モジュールに内蔵されている光アイソレー

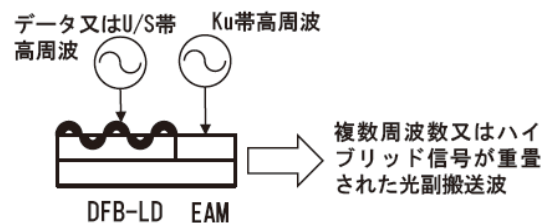


図1 EML断面図と電気入力・光出力の関係  
EAM: 光変調器

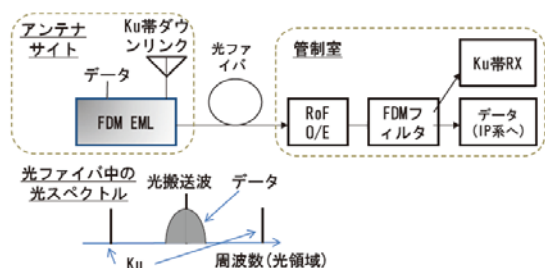


図2 高周波信号の周波数変換を伴わないハイブリッド RoF システム(タイプ1)

FDM: 周波数分割多重、Ku: 約13GHzのダウンリンク信号、O/E 光電気変換、RX: 受信機

タを不要にする技術が必要であることの2点を実現されなければならないが、これらをクリアした EML モジュールが連携研究者、連携協力者から提供された。

EML を活用し、モデルとして人工衛星地球局を想定し、ハイブリッド伝送の手段2種を提案した。図2、3にそれぞれ高周波信号の周波数変換を伴わない、又は伴うハイブリッド RoF システムの構成を示す。図2を用いて前者、すなわちタイプ1の原理を説明する。アンテナサイトで発生するデータ（アンテナの方位・仰角情報や監視カメラ）と Ku 帯ダウンリンク信号は、それぞれ EML の DFB-LD と光変調器に入力され、多重化された光副搬送波が光ファイバを介して管制室へと伝送される。同軸ケーブルでは大変損失が大きい Ku 帯高周波信号が RoF の採用によりほぼ無損失で伝送可能である。図2に示される光スペクトルのように、データと Ku 帯信号は完全に分離された FDM によって伝送可能であることが分かる。

衛星ダウンリンク周波数が約 13GHz と高く、扱いにくい周波数であることを考えれば、電子回路ではなく光部品で周波数変換することも現実的ソリューションのひとつになる。図3はハイブリッド RoF システム(タイプ2)を示す図である。構成が複雑であること、産業財産権2件がまだ出願手続き中であることから、簡略化された図3にて説明を行う。管制室側(右)からアンテナサイト(左)へ周波数変換のための局部発振(L0)を光副搬送波として光ファイバを経由して伝送する。EML のうちの光変調器がフォトダイオード(PD)としても機能すること、光変調器の電圧-透過率に非線形があることを利用すると、光領域にて EML と簡単な電子回路で、光副搬送波の周波数変換を直接的に行うことができる。図3の右下に示された左から右のスペクトルから分かるように、光副搬送波としてデータと Ku 帯から周波数変換された IF (中間周波数) が光ファイバを介して伝送される。

## (2) 実験

提案した3つのシステムのうち、①は実現性が低く、③は興味深いシステムであるものの本研究の資源の制約から期限内の実施が困難であることから、②に注力して、実験検証を行った。③は他の基金によって平成25年度に実施予定である。

EML を適用した②のシステム(タイプ1)について、DFB-LD 及び光変調器の変換効率、線形性(歪)、周波数特性、雑音などについての測定及びデモ実験のためのモデル化を行った。

EML の DFB-LD はチップもモジュールも周波数特性を考慮してチップ製造されたもので

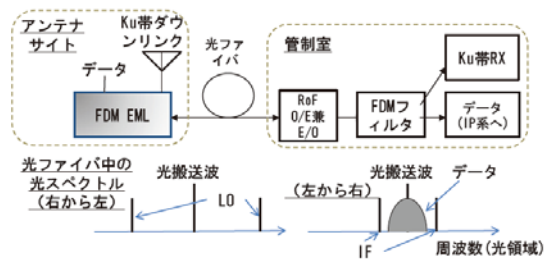


図3 高周波信号の周波数変換を伴わないハイブリッド RoF システム(タイプ2)  
LO: 局部発振、IF: 中間周波数

はないため、周波数特性が不安要素であった。実際には外部回路によって適当にインピーダンス整合して測定すると、DFB-LD の 3dB 帯域は 3GHz であることが分かった。データであればギガビット・イーサ(GbE)、人工衛星応用であれば S 帯の 2.2GHz 帯まで使用することが分かった。光変調器の 3dB 帯域は 13GHz を越えており、大学人工衛星のすべての周波数帯で使用しうる。

変換効率と線形性(歪)を同時に評価した結果を図4に示す。EML の DFB-LD に S 帯( $f_1=2\text{GHz}$ )を、光変調器に Ku 帯( $f_2=13\text{GHz}$ )を入力した結果である。2、13GHz に対する変調度はそれぞれ 10%、1%であった。いずれの周波数に対しても十分な出力が得られた。DFB-LD 及び光変調器の非線形性に伴う 3 次歪が和差周波(11, 15GHz)に見られる。図示の結果では電波法令に適合しないが、変調度の最適化や簡易な周波数フィルタで低減可能であることが分かった。

ここでは、2つの周波数の同時伝送の結果を示したが、データ(デジタル)と高周波(アナログ)の多重であっても、伝送可能であることは確認済みである。

光部品がアナログ伝送において雑音源となることが報告されているので、EML の位相雑音を測定した。搬送波からのオフセットが

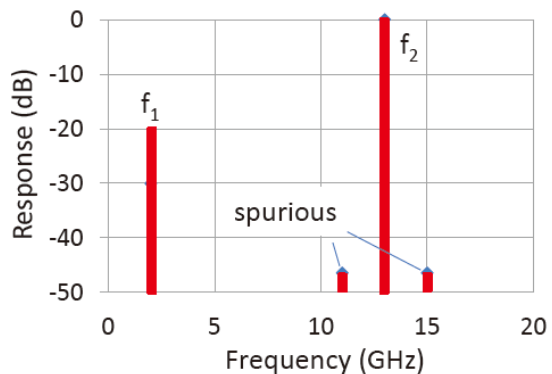


図4 EML にて S 帯( $f_1$ )と Ku 帯( $f_2$ )を同時伝送した後の高周波スペクトル(0/E 変換後)

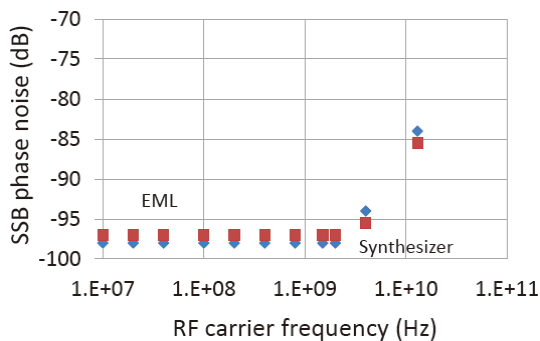


図5 EMLで発生した位相雑音スペクトル  
(使用したシンセサイザとEML出力の比較)

10kHzであるSSB位相雑音の周波数依存性を図5に示す。使用したシンセサイザからの位相雑音とEML出力を2乗検波した位相雑音をプロットした。約3GHz以上においてシンセサイザ自身の位相雑音が増加している。EMLで付加された位相雑音は1dB程度であり、実用上問題ない特性であることが分かった。

### (3) 付加的な成果

本研究を進める過程にて、光周波数コム発生器における位相雑音特性の理論的考察、光デバイスの周波数特性方法、100GbE用光モジュールの開発などの付加的な成果を上げることができた。

### (4) 結論

IPネットワークと親和性がよく、IP(デジタル)と高周波信号(アナログ)を1本の光ファイバで同時に多重化して伝送するデジタルRoFシステムやハイブリッドRoFシステムについて、合計3種類の提案を行った。

現段階のエンジニアリング技術の中で最も実現性が高いと考えられるハイブリッドRoFシステムについて、基本技術を実験的に確認し、一部のデモンストレーションを行った。鹿児島大学プロジェクトである大学人工衛星の衛星地球局に本システムを適用することを前提に光デバイスの特性を実験的に確認した。DFB-LD及び光変調器の両方に信号を印加したEMLによって、ハイブリッドRoFシステムが実現できることが分かった。

学会・論文誌発表、特許出願に加えて、開発パートナー探しのために鹿児島大学シーズ集(冊子及びWEB)によって外部へ技術を広報した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① 福島誠治, A. J. Seeds, 光周波数コム発生器とビート光混合に基づいたミリ波発

生における位相雑音低減, 信学技報, MW2011-124, 査読無, 2011, pp. 65-68

[学会発表] (計6件)

- ① S. Fukushima, T. Shimaki, T. Funasako, N. Miura, K. Yamashita, T. Hachino, Y. Igarashi, Cube Satellite Earth Station Based on Bidirectional WDM Radio-on-Fiber Link, 2013 Asia-Pacific Radio Science Conference, 査読有 (2013年9月, 台北, Nat' 1 Taiwan Univ.) 採択済み
- ② S. Fukushima, N. Miura, T. Shimaki, K. Yamashita, T. Funasako, T. Hachino, Y. Igarashi, Electro-absorption modulator integrated laser application to a cube satellite earth station, The 10<sup>th</sup> Conf. on Lasers and Electro-Optics, 査読有 (2013年7月3日, 京都, 信学会) 採択済み
- ③ 山下広太, 福島誠治, 三浦直利, 島木隆行, 船迫太志, 八野知博, 五十嵐保隆, RoFリンクを用いたキューブ衛星地球局へのEML応用, 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 査読無 (2013年4月25日, 静岡, 信学会)
- ④ 福島誠治, 大学人工衛星KSATの開発を通じたプロジェクト・マネジメントのOJT, PMI JAPAN FROUM 2012, 招待講演 (2012年7月7日, 東京, PMI JAPAN)
- ⑤ 島木隆行, 福島誠治, 八野知博, 五十嵐保隆, ビート光混合に基づくミリ波発生における位相雑音低減, 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 査読無 (2012年4月26日, 静岡, 信学会)

[産業財産権]

○出願状況 (計4件)

- ① 名称: 光デバイスの周波数測定装置  
発明者: 福島誠治, 伊藤敏夫  
権利者: 鹿児島大学, 日本電信電話株式会社  
種類: 特許  
番号: 特願 2012-150709  
出願年月日: 2012年7月4日  
国内外の別: 国内
- ② 名称: 光通信システム, 光送信装置および光受信装置  
発明者: 福島誠治, 伊藤敏夫  
権利者: 鹿児島大学, 日本電信電話株式会社  
種類: 特許  
番号: 特願 2012-152630  
出願年月日: 2012年7月6日  
国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ

<http://www.eee.kagoshima-u.ac.jp/~fuku-lab/>

鹿児島大学シーズ集

<http://www.rdc.kagoshima-u.ac.jp/rdc/search/upload/fukushima-eng.pdf>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

福島 誠治 (FUKUSHIMA SEIJI)

鹿児島大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：10610214

### (2) 研究協力者

大木 明 (OHKI AKIRA)

NTT フォトニクス研究所・主任研究員

研究者番号：30557658

伊藤 敏夫 (ITO TOSHIO)

NTT フォトニクス研究所・主任研究員