

1V-04 ソフトウェア定義光ファイバ無線のスループット性能及び拠点相互接続性について

相浦 一樹<sup>†</sup> 福井 達也<sup>‡</sup> 成川 聖<sup>‡</sup> 南 勝也<sup>‡</sup> 椎名 亮太<sup>‡</sup>  
 石岡 卓将<sup>†</sup> 藤橋 卓也<sup>†</sup> 猿渡 俊介<sup>†</sup> 渡辺 尚<sup>†</sup>

<sup>†</sup>大阪大学 <sup>‡</sup>日本電信電話株式会社 NTT アクセスサービスシステム研究所

1 はじめに

筆者らは、これまでに光と無線を密結合したアーキテクチャとして「ソフトウェア定義光ファイバ無線 (SD-RoF: Software Defined Radio-on-Fiber)」を用いたワイヤレスネットワークを提案してきた [1]。SD-RoF は既存の RoF を用いたシステムで固定的であったアンテナと無線送受信機の関係をソフトウェア的に自由自在に制御可能とするアーキテクチャである。本稿では、SD-RoF の構成技術である「振幅遅延制御回路を用いた RoF パスルー技術」を用いた 2 拠点間相互接続のスループット性能と「光スイッチと電気合波回路を組み合わせた RoF ネットワーク技術」を用いた複数拠点間相互接続における構成機器要件を評価する。

2 2 拠点間相互接続機能

2.1 振幅遅延制御回路を用いた RoF パスルー技術

RoF パスルー技術とは 2 地点の基地局を RoF で接続することで異なる地点に存在する端末同士の双方向通信を実現する技術である。RoF を利用することで特定の無線通信規格に依存しない上に大容量かつ低遅延な通信を実現できる [2]。提案手法では 2 拠点の送信アンテナと受信アンテナをそれぞれ異なる RoF 伝送路で接続する。しかしながら、単純に 2 拠点の送受信アンテナを RoF で接続すると RF 信号がループして通信できない。この問題に対して、提案システムでは振幅遅延制御回路を用いることで RoF を用いた双方向通信を実現する。

図 1 に振幅遅延制御回路を用いた RoF パスルー技術の全体像を示す。拠点  $\alpha$  の無線端末から送信された電波は基地局  $\alpha$  で受信されて、RoF を介して基地局  $\beta$  に送信される。基地局  $\beta$  の送信アンテナから送信された信号は拠点  $\beta$  の端末だけでなく、基地局  $\beta$  の受信アンテナでも受信されるため信号がループして自己干渉信号となる。提案手法では、振幅遅延制御回路に入力された信号の振幅と位相を制御して、受信アンテナで受信した信号と逆位相の信号を生成する。生成した逆位相の信号と自己干渉信号を重ねることによって信号のループを解消する。

振幅遅延制御回路の位相制御に用いるパラメータは気温などの伝送路の変化に追従することを目的にして、一定時間ごとにキャリアブレイション回路によるキャリアブレイションでパッシブに決定する。より具体的には、キャリアブレイション回路から無変調連続波を送出して分配器で送信アンテナと振幅遅延制御回路に入力する。受信アンテナで受信した信号と振幅遅延制御回路で生成した信号を重ねて分配器でキャリアブレイション回路に入力する。キャリアブレイション回路ではキャンセル後の信号の RSSI が最小となるように振幅遅延制御回路の位相と遅延を決定する。

2.2 2 拠点間相互接続時のスループット評価

RoF パスルー技術による通信性能への影響を確認することを目的として、異なる電波空間に存在する無線端末同士が相互通信する際のスループットを計測する実験を行った。図 2 に実験 1 の構成図を示す。各実験は電波暗室 2 部屋にまたがって実施した。実験 1 では電波暗室 1 部屋に無線端末 6 台を設置して、3 ペアで同時に TCP 通信、UDP 通信した場合のスループット合計値を測定した。表 1 に使用する無線端末の構成を示す。スループット測定には iperf3 を使用して TCP 通信時および UDP 通信時のスループットを計測する。このとき、UDP 通信が使用する帯域は 100 Mbps とした。6 台の無線端末から相互通信する 3 ペアを構築するために、無線端末 1 と無線端末 4 に通信チャネルとして ch 1、端末 2 と端末 5 に通信チャネルとして ch 6、端末 3 と端末 6 に通信チャネルとして ch 11 を割り当てた。

図 3 に実験 2 の構成図を示す。実験 2 では電波暗室 1 内にエッジ基地局 A と無線端末 3 台、電波暗室 2 内にエッジ基地局 B と無線端末 3 台を設置して 3 ペアで同時に TCP 及び UDP 通信した場合のスループットの合計値を測定した。このとき、電波暗室 1 にはエッジ基地局 A と各無線端末のアンテナとの距離が 25 cm となるように無線端末 1、無線端末 2、無線端末 3 を設置した。同様に、電波暗室 2 にはエッジ基地局 B と各無線端末のアンテナとの距離が 25 cm となるように無線端末 4、無線端末 5、無線端末 6 を設置した。それぞれの電波暗室に設置したエッジ基地局 A、B は光ファイバで相互接続した。各エッジ基地局は送信アンテナ、受信アンテナ、振幅遅延制御回路、RoF 送信機 (RoF TX)、RoF

表 1: 無線端末構成

構成	
OS	Ubuntu Server 18.04 LTS
PC	Panasonic CF-B11QWHB
NIC	Intel Centrino Advanced-N 6205
通信規格	IEEE 802.11b/g

表 2: エッジ基地局構成

構成	
振幅遅延制御回路: 位相器	Skyworks 製 SKY12343-364LF
振幅遅延制御回路: 減衰器	M/A-COM Technology Solutions 製 MAPS-010164
キャリアブレイション 用送信機	Texas Instruments 製 CC2531F128, Silicon Labs 製 C8051F360
RoF 送信機	精工技研製 E'T-615
RoF 受信機	精工技研製 ER-615

受信機 (RoF RX)、キャリアブレイション用の送信機で構成される。表 2 に各エッジ基地局の構成を示す。振幅遅延制御回路のキャリアブレイションは無変調連続波を使用して 1 度のみ実行する。RoF 受信機から送出された信号は増幅器によって増幅する。増幅器の信号増幅率は約 18 dB としている。

図 4 に実験 1 と実験 2 において計測されたスループットをそれぞれ示す。実験 1 では TCP の場合で 37.6 Mbps、UDP の場合で 64.3 Mbps のスループットが計測された。実験 2 では TCP の場合で 7.32 Mbps、UDP の場合で 8.15 Mbps のスループットが計測された。実験結果から、実験 2 のスループットは実験 1 のスループットと比較して非常に低くなっていることが分かる。図 5 に実験中に観測した電波暗室 1 と電波暗室 2 内のスペクトルを示す。図 5 の結果からスループット低下は異なる電波暗室の無線端末間での受信信号強度 (Received Signal Strength Indicator: RSSI) の低下によるものと推測される。本実験環境では他無線端末からの電波干渉がほぼ無視できることから考えると、受信信号強度が低下した一要因は無線端末のアンテナ性能によるものではないかと推測される。本想定が正しいかを検証するためにより高いアンテナ性能を有した無線端末による再実験が必要だと考えている。

3 複数拠点間相互接続機能

3.1 光スイッチと電気合波回路を組み合わせた RoF ネットワーク技術

RoF ネットワーク技術とは、RoF パスルー技術の機能を具備した基地局をスイッチなどを用いてネットワーク化する技術である。SD-RoF における低遅延性を実現するためには基地局間の伝送の大部分に光信号を用いることが望ましい。しかしながら、基地局間の伝送に光信号のみを用いる場合には同じ伝送路に同波長の光信号が流れ込むと衝突してデータバケットが損失するという光信号固有の問題を考慮する必要があるため、コストや複雑さの観点から柔軟な拠点相互接続を実現するネットワークを設計することが難しい。本稿では、柔軟な電波空間の相互接続の実現を目的として単純な光スイッチと電気合波回路を組み合わせた RoF ネットワーク技術を提案する [3]。電気合波回路は電気信号と光信号の相互変換・複数の電気信号を合波する機能を具備する。より具体的には、電気合波回路を RoF ネットワーク内のコアのみ、エッジのみ、コアとエッジの双方に配置した RoF ネットワーク技術をそれぞれ提案する。

3.1.1 コア部分に電気合波回路を配置した RoF ネットワーク技術

図 6 に、電気合波回路を RoF ネットワークのコア部分に 1 台配置した場合の RoF ネットワークの全体像を示す。本方式では、光スイッチの入出力ポート数を含むシステム全体の構成がシンプルになる利点がある。しかしながら、コア電気合波回路に必要な入出力ポート数が多くなる。

図 6 に、RoF ネットワークのコア部分に電気合波回路を配置した場合における電波空間 1、電波空間 2、電波空間 3、電波空間 4 を相互接続する場合の例を示す。具体的に、エッジ基地局 1 に対してエッジ基地

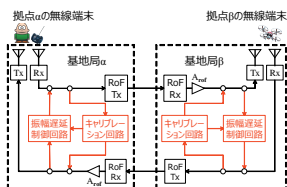


図 1: 振幅遅延制御回路を用いた RoF パスルー技術

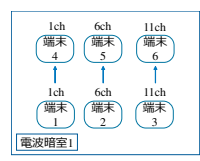


図 2: 実験 1 の構成図

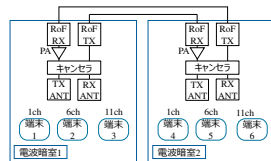


図 3: 実験 2 の構成図

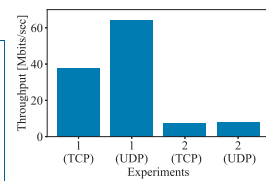


図 4: 各実験で観測した TCP/UDP スループット

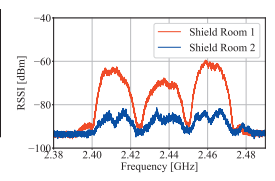


図 5: 各電波暗室内のスペクトル

局 2, エッジ基地局 3, エッジ基地局 4 のデータを送信することを考える。エッジ基地局 2, エッジ基地局 3, エッジ基地局 4 はコア電気合波回路に光信号を送信する。コア電気合波回路は, エッジ基地局 2, エッジ基地局 3, エッジ基地局 4 の光信号を電気信号に変換して合波したものを光信号に変換してエッジ基地局 1 に送信する。

3.1.2 エッジ部分に電気合波回路を配置した RoF ネットワーク技術

図 7 に, RoF ネットワークのエッジ部分にエッジ基地局数分の電気合波回路を配置した場合の RoF ネットワークの全体像を示す。図 7 では, エッジ基地局と光スイッチを接続する光ファイバのうち, 上り部分に光スプリッタ, 下り部分にエッジ電気合波回路を具備している。本方式は, コア部分に電気合波回路を配置する場合と比較して, 電気合波回路に必要な入出力ポート数が少なくなる利点がある。しかしながら, 各エッジ基地局に対してエッジ電気合波回路を配置する必要があるため, エッジ部分に必要となる電気合波回路数が増える問題がある。

図 7 に, RoF ネットワークのエッジ部分に電気合波回路を配置した場合の電波空間 1, 電波空間 2, 電波空間 3, 電波空間 4 を相互接続する場合の例を示す。具体的に, エッジ基地局 1 に対してエッジ基地局 2, エッジ基地局 3, エッジ基地局 4 のデータを送信することを考える。エッジ基地局 2, エッジ基地局 3, エッジ基地局 4 が送信した光信号は光スプリッタ 2, 光スプリッタ 3, 光スプリッタ 4 でそれぞれ 3 つの光信号に分波されて光スイッチに送信される。光スイッチは, エッジ電気合波回路 1 に対して光スプリッタ 2 から分波した 1 光信号, 光スプリッタ 3 から分波した 1 光信号, 光スプリッタ 4 から分波した 1 光信号を送信する。エッジ電気合波回路 1 は, 光スイッチから受信した 3 つの光信号をそれぞれ電気信号に変換して合波したものを光信号に変換してエッジ基地局 1 に送信する。

3.1.3 エッジ部分とコア部分の両方に電気合波回路を配置する RoF ネットワーク技術

図 8 に, RoF ネットワークのエッジ部分とコア部分の両方に電気合波回路を配置した場合の RoF ネットワークの全体像を示す。具体的には, 複数コア電気合波回路を光スイッチの上位に, 各エッジ基地局数分のエッジ電気合波回路を各エッジ基地局と光スイッチを接続する下りの光ファイバに具備する。また, コア電気合波回路と光スイッチを接続する下り側光ファイバ 1 本に光スプリッタを接続する。

本方式では, 各コア電気合波回路で構築した複数の相互接続グループを, エッジ電気合波回路で 1 相互接続グループとしてまとめることができる。本方式においてはコア部分に電気合波回路を配置する場合と比較して, 入出力ポート数が少ないコア電気合波回路を複数個用意することで同数のエッジ基地局を相互接続できる。しかしながら, 他方式と比較して相互接続に必要な電気合波回路の総数が増える。

図 8 に, RoF ネットワークのエッジ部分とコア部分の両方に電気合波回路を配置した場合における電波空間 1, 電波空間 2, 電波空間 3, 電波空間 4 を相互接続する場合の例を示す。具体的に, エッジ基地局 1 に対してエッジ基地局 2, エッジ基地局 3, エッジ基地局 4 のデータを送信することを考える。エッジ基地局 1, エッジ基地局 2 は光信号を光スイッチを介してコア電気合波回路 1 に, エッジ基地局 3, エッジ基地局 4 から送信された光信号は光スイッチを介してコア電気合波回路 2 に送信する。コア電気合波回路 2 はエッジ基地局 3, エッジ基地局 4 から受信した各光信号を電気信号に変換して 1 つの電気信号に合波したものを光信号に変換する。この光信号はスプリッタ 2 で 2 つの信号に分波される。一方で, コア電気合波回路 1 ではエッジ基地局 2 から受信した光信号をそのまま光スイッチに返送する。コア電気合波回路 2 が送信した光信号を分波した 1 光信号とエッジ基地局 2 から送信された光信号は光スイッチを介してエッジ電気合波回路 1 に送信する。エッジ電気合波回路 1 では, 入力された 2 つの光信号を電気信号へと変換・合波した後, 光信号に変換してからエッジ基地局 1 に送信する。

3.2 RoF ネットワーク技術の相互接続性評価

提案システムにおける複数拠点間の相互接続性を示すことを目的として  $N$  個の電波空間を相互接続する場合の構成機器要件について評価した。表 3 に, コア部分のみ, エッジ部分のみ, コア部分とエッジ部分の両方に電気合波回路を配置したときの RoF ネットワークにおける電気

表 3:  $N$  個の電波空間を相互接続する場合に必要なコア電気合波回路, エッジ電気合波回路構成

電気合波回路配置	コア電気合波回路ポート数	コア電気合波回路個数	エッジ電気合波回路ポート数	エッジ電気合波回路個数
コアのみ	$N \times N$	1	-	-
エッジのみ	-	-	$(N-1) \times 1$	$N$
コアとエッジ両方	$M \times (M+1)$	$S$	$S \times 1$	$N$

合波回路の必要ポート数と必要個数を示す。また, コア部分とエッジ部分の両方に電気合波回路を配置する場合, コア電気合波回路が  $S (> 1)$  個あるとして, 各コア電気合波回路が構築した相互接続グループに属するエッジ基地局数が  $M = N/S$  であるとした。

電気合波回路をコア部分に配置する場合, 電気合波回路に必要な入出力ポート数は  $N \times N$  となる。コア電気合波回路は  $N$  台のエッジ基地局から光信号を受け取って, 合波した  $N$  個の光信号を各エッジ基地局に対して返送する。電気合波回路をエッジ部分に配置する場合, 電気合波回路に必要な入出力ポート数は  $(N-1) \times 1$  となる。各エッジ電気合波回路は, 自身を除く  $N-1$  台のエッジ基地局から光信号を受信する。その後,  $N-1$  個の光信号を合波して得た 1 光信号をエッジ基地局に送信して  $N$  個の電波空間を相互接続する。コア部分に電気合波回路を配置する場合と比較して必要となる入出力ポート数は少なくなる一方, 必要となる電気合波回路数はすべてのエッジ基地局に相当する  $N$  個となる。電気合波回路をエッジ部分とコア部分両方に配置する場合, コア電気合波回路に必要な入出力ポート数は  $M \times (M+1)$ , エッジ電気合波回路に必要な入出力ポート数は  $S \times 1$  となる。コア電気合波回路では, コア部分のみに電気合波回路を配置した場合と同様に, 相互接続グループに属する  $M$  台のエッジ基地局に対する入出力ポートが必要になることに加えて, エッジ電気合波回路で他のコア電気合波回路に属する相互接続グループと統合するための合波済光信号を出力する 1 出力ポートが必要となる。エッジ電気合波回路では  $S$  個ある各コア電気合波回路で合波された  $S$  個の光信号を受信して 1 つの光信号に合波することで複数の相互接続グループを 1 つの相互接続グループに統合する。コア部分のみおよびエッジ部分のみに電気合波回路を配置する場合と比較すると, 必要となる電気合波回路の総数が増える一方, 各電気合波回路に必要な入出力ポート数は小さくなる。

以上の評価結果から, 少数の電波空間を相互接続する場合はコア部分あるいはエッジ部分のいずれかに小規模の電気合波回路を設置するべきだと分かる。一方で相互接続する電波空間数が多い場合にはコア部分とエッジ部分の双方に小規模の電気合波回路を配置するべきだと分かる。

4 おわりに

本稿では, SD-RoF の構成技術である「1. 振幅遅延制御回路を用いた RoF パススルー技術」と「2. 光スイッチと電気合波回路を組み合わせた RoF ネットワーク技術」の有効性をスループットと複数拠点相互接続性の観点から評価した。今後の課題として, 2 拠点間相互接続時のスループット低下の要因を明らかにすることを目的に高性能アンテナを有した無線端末によるスループット測定を行うことが挙げられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP19H01101, JP18H0323) の支援の下で行った。

参考文献

- [1] 石岡, 他. 無線通信における低遅延性と広帯域性を実現するソフトウェア定義光ファイバ無線に関する検討. マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2019), pp. 1-10, 2019.
- [2] 宮本健司. Radio over Fiber 技術の無線アクセスネットワークへの統合に関する研究. PhD thesis, 大阪大学 大学院工学研究科 電気電子情報工学専攻, January 2017.
- [3] 相浦, 他. SD-RoF に対する電気合波回路導入による複数電波空間の相互接続に関する基礎検討. 電子情報通信学会ソサイエティ大会, pp. 1-1, 2019.

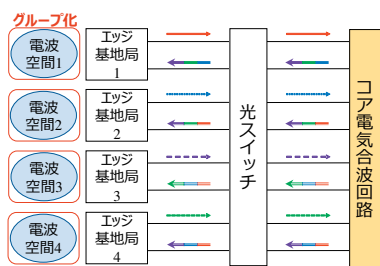


図 6: 電気合波回路をコアに配置した場合の RoF ネットワーク

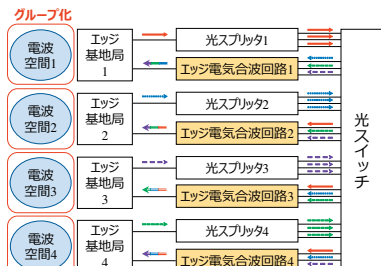


図 7: 電気合波回路をエッジに配置した場合の RoF ネットワーク

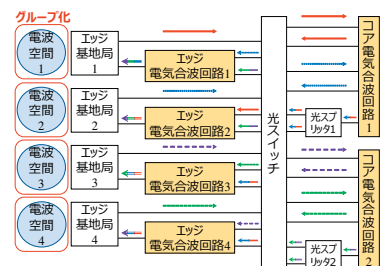


図 8: 電気合波回路をコアとエッジ両方に配置した場合の RoF ネットワーク