

# ソフトウェア定義光ファイバ無線を用いた複数電波空間の 相互接続に関する一検討

相浦 一樹<sup>1</sup> 椎名 亮太<sup>2</sup> 福井 達也<sup>2</sup> 成川 聖<sup>2</sup> 南 勝也<sup>2</sup> 石岡 卓将<sup>1</sup> 藤橋 卓也<sup>1</sup> 猿渡 俊介<sup>1</sup>  
渡辺 尚<sup>1</sup>

**概要:** ドローンや自動車などのネットワーク経由での制御, 遠隔手術・遠隔診療, オンラインゲームなどのサービスの実現に向けて, 大容量性と低遅延性を両立したネットワーク技術が待望されている. 筆者らは, 大容量性と低遅延性を両立した新たなネットワーク技術の実現に向けて「ソフトウェア定義光ファイバ無線 (SD-RoF: Software Defined Radio-over-Fiber)」を用いた無線アクセスネットワークの検討を進めている. SD-RoF は, 既存の IP (Internet Protocol) で構築された無線アクセスネットワークを「振幅遅延制御回路を用いた光ファイバ無線双方向パススルー技術」と「光スイッチと電気合波回路を組み合わせたソフトウェア定義 RoF ネットワーク技術」の 2 つの構成技術で置き換える試みである. 本稿では, SD-RoF の 1 構成技術である光スイッチと電気合波回路を組み合わせたソフトウェア定義 RoF ネットワーク技術を提案する. 光スイッチと電気合波回路を組み合わせて RoF をネットワーク化することで複数の電波空間を自由に相互接続する. 相互接続可能な電波空間数を指標とした性能評価から光スイッチと電気合波回路を組み合わせたソフトウェア定義 RoF ネットワーク技術の有効性を示す. また, RoF ネットワーク内における光スイッチ・電気合波回路の配置がもたらすアーキテクチャへの影響について光ファイバの総本数の観点から解析した.

## 1. はじめに

情報技術の発展に伴って, 大容量性と低遅延性を両立するネットワークの実現が課題となっている. スマートフォンやタブレット PC などのモバイル端末が登場したことで, 誰もが手軽にインターネットに接続してオンラインサービスを受けることが可能になった. 特に, Amazon, Netflix などのオンライン映像配信サービスや YouTube などの動画を利用する SNS (Social Networking Service), Google Stadia に挙げられるクラウドゲーミング [1] など非常に大きな通信容量を必要とするコンテンツは今後も増加していくことが予想される. また, IoT (Internet of Things) 技術の発展によって多くの分野で遠隔からモノを管理・制御する需要も高まりつつある [2]. 例えば, 自動車分野においてはコネクテッドカーの開発が進められている [3]. コネクテッドカーとは, 自動車本体をネットワークに接続することで様々なサービスを受けることのできる自動車である. 自動車の制御を担うデバイスをネットワークに接続することで遠隔から自動車の制御や安全性の確保, 交通情報の取得などが可能となる. 医療分野では, MIoT (Medical

Internet of Things) [4] と呼ばれる医療に特化した IoT 技術や IoT 端末を活用した遠隔医療サービスが進められている. 例えば, ウェアラブル型の IoT デバイスを用いて患者の健康データを逐次的に収集することで, 遠隔地から患者の健康状態をリアルタイムに確認することができる. 物流分野では, ドローンを活用した荷物配達を検討されている [5]. ドローンの自動操縦で小荷物の配達を行うことで, 人手不足の解消や配送時間の短縮が見込まれる. 上述のような通信のリアルタイム性が重要となるアプリケーションにおいては, 大容量性だけでなくネットワーク遅延を極限まで小さくすることが求められる.

図 1 に既存システムと提案システムとの比較を示す. 現在, 多くの無線アクセスネットワークは, 図 1 (a) のようにエッジからコアにいたるまで IP (Internet Protocol) を用いたネットワークを構築している. 各無線端末はエッジ側に配置された基地局となる無線送受信機を介して異なる地点の無線端末との相互通信を実現するが, 無線送受信機とコア側との境界部分で伝送遅延が増大する. ここで, 伝送遅延とは無線端末が送信したパケットを有線通信するために電気信号や光信号に変換して送信を完了するまでにかかる時間を指す. ここ数年においては, 図 1 (b) のように

<sup>1</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科

<sup>2</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

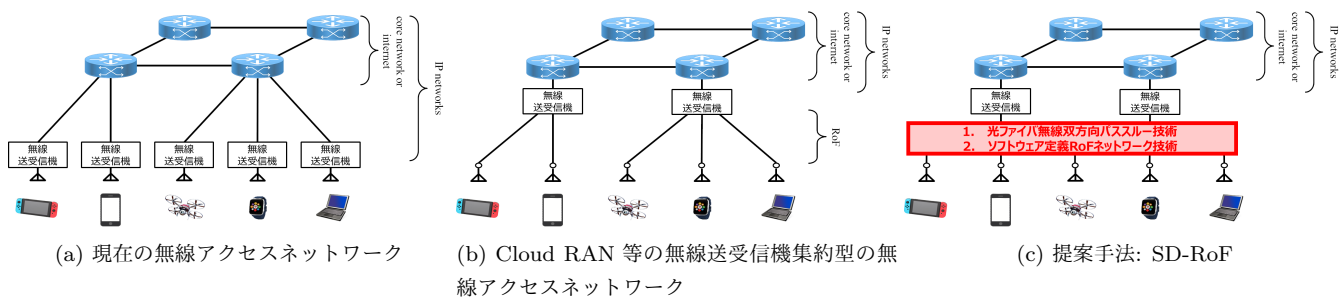


図 1: 既存のシステムと提案システムの比較

無線通信効率の向上を目的として無線送受信機を集約して管理する C-RAN (Cloud Radio Access Networks) に代表される無線アクセスネットワークが提案されている [6]. 無線送受信機集約型の無線アクセスネットワークにおいても、同様に無線送受信機とコア側との境界部分で伝送遅延が増大する。以上より、ネットワーク遅延を小さくするためには伝送遅延を抑制する必要がある。

本稿ではこのような観点から、光と無線を密結合したアーキテクチャであるソフトウェア定義光ファイバ無線 (SD-RoF: Software Defined Radio-over-Fiber) を用いた無線アクセスネットワークを提案する。SD-RoF は、無線送受信機集約型の無線アクセスネットワークをさらに拡張したネットワークアーキテクチャである。具体的には、図 1 (c) のようにベースバンド処理を集約した無線アクセスネットワークの RoF 部分をネットワーク化してアンテナ・無線送受信機の間をソフトウェア的に自由に制御できるようにする。

SD-RoF は、既存の IP で構築された無線アクセスネットワークを置き換えるために以下の 2 技術を組み合わせる。

- (1) 振幅遅延制御回路を用いた光ファイバ無線双方向パススルー技術
- (2) 光スイッチと電気合波回路を組み合わせたソフトウェア定義 RoF ネットワーク技術

光ファイバ無線双方向パススルー技術は、空間的に離れた 2 地点に存在する無線端末同士を SD-RoF を介することで電波で相互に通信できるようにする技術である [7]. 本技術ではアナログ RoF を用いて端末間の通信をアナログ信号のままで中継するため、既存の無線アクセスネットワークにおける端末間通信と比較して、通信時の伝送遅延を削減することができる。一方で、2 地点のアンテナを単純に RoF を用いて相互接続するだけでは、自己干渉によって信号のループが発生するため通信できない。そこで、振幅遅延制御回路を各拠点の送信アンテナと受信アンテナの間に挿入・送信アンテナから送信される信号と逆位相同振幅の信号を生成して、受信した自己干渉信号に重畳することで信号のループを解消する。

「1. 振幅遅延制御回路を用いた光ファイバ無線双方向

パススルー技術」は 2 地点のアンテナを相互接続する技術であり、3 地点以上のアンテナと相互接続することは困難である。具体的には、3 地点以上のアンテナと光ファイバ無線双方向パススルー技術を用いて相互接続する場合、ある地点のアンテナは 1 本の光ファイバを介して別地点のアンテナから送出された複数の光信号を受信する必要がある。このとき、複数の同波長光信号が同一の光ファイバ上に流れると光信号間で衝突が発生する。光波長多重通信 (Wavelength Division Multiplexing: WDM) の利用を前提として各アンテナから異なる波長の光信号を送出する方法も挙げられるが、光分波器や光合波器の導入が必要となって RoF ネットワークの内部構成が複雑となるため導入コストが増大する。

本稿では、SD-RoF のもう一つの構成技術である光スイッチと電気合波回路を組み合わせたソフトウェア定義 RoF ネットワーク技術を提案する。本手法を用いて RoF をネットワーク化することで 3 地点以上のアンテナ間の相互接続、アンテナ間の接続関係をソフトウェア的に自由に制御可能とすることを目指す。「2. 光スイッチ・電気合波回路を組み合わせたソフトウェア定義 RoF ネットワーク技術」では、単一波長の光信号を利用して複数地点のアンテナを相互接続するために電気合波回路を RoF ネットワークに導入する。電気合波回路は、1) 入力された複数の光信号をそれぞれ電気信号である RF 信号に変換する機能、2) 各 RF 信号を適宜異なる周波数に変換する機能、3) 複数の RF 信号を 1 つの RF 信号に合成する機能、4) 合成した RF 信号を再度光信号に変換して出力する機能を有する回路である。電気合波回路を導入することによって、各地点のアンテナは複数地点のアンテナから送出された複数の光信号を 1 つに合波された光信号として受信できるため、複数電波空間の相互接続で生じる光信号同士の衝突を抑制することができる。

複数電波空間の相互接続に関する評価として、光スイッチのみの RoF ネットワークと光スイッチ・電気合波回路を組み合わせた RoF ネットワークにおいて相互接続可能な電波空間数を評価した。評価結果から、光スイッチのみで構成した RoF ネットワークと比較して光スイッチ・電

気合波回路を組み合わせた RoF ネットワークはより多くの電波空間を相互接続できることを確認した。

以降の構成は以下の通りである。2 節では、複数地点の無線端末が広帯域かつ低遅延に通信することが必要なアプリケーションとその要件について述べる。3 節で提案手法である光スイッチと電気合波回路を組み合わせたソフトウェア定義 RoF ネットワーク技術について述べる。4 節では複数電波空間の相互接続における解析結果について述べる。最後に 5 節においてまとめを述べる。

## 2. 無線通信エリア拡張技術

### 2.1 アプリケーションシナリオ

無線通信エリア拡張技術とは、無線通信規格で規定された距離以上に離れた遠隔の無線端末との通信を実現する技術である。本研究が実現する無線通信エリア拡張技術は、直接電波の届かない複数地点に存在する無線端末が広帯域かつ低遅延に双方向通信を行うことが必要なアプリケーションへの利用を想定している。1 つ目のアプリケーション例として、ある家族が個々に所有する無線端末で別々の場所から近隣の無線ネットワークを介してホームネットワークの Wi-Fi にアクセスする場合を考える。Wi-Fi 機器は無線通信規格として IEEE 802.11 規格を用いる。IEEE 802.11 規格では最大でも数百メートルの範囲でしか通信できないため、各自が外出先からホームネットワークに直接接続することは難しい [8]。2 つ目のアプリケーション例として、遠隔地に点在する複数のプレイヤーがゲーム端末の無線通信機能を利用して共通のゲームを協力プレイ・対戦プレイする場合を考える。例えば、家庭用ゲーム機を用いたワイヤレス対戦においては、各プレイヤーが保持する家庭用ゲーム機本体同士の無線通信を通して相互にゲーム情報をリアルタイムに送受信することでグループ内において共通ゲームの対戦プレイ・協力プレイが可能になる。一方で、多くの家庭用ゲーム機が無線通信規格として IEEE 802.11 規格を用いるため、遠隔地に点在するプレイヤーのゲーム端末間で直接接続することは困難である。

### 2.2 要件

このようなアプリケーションを実現するためには以下の 4 つの要件を満たす無線通信エリア拡張技術の実現が必要である。

1 つ目は、多様に存在する無線通信規格を変更なしに利用できることである。2.4 GHz 帯を使用する無線通信規格だけでも Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee などを使用する端末が既に存在している。特定の無線通信規格に依存せずに柔軟に無線通信エリアを拡張できることが理想的である。

2 つ目は、広帯域通信の実現である。空間においては異なる端末が発した電波が干渉波となる。無線通信では近隣の端末との電波干渉を避けるために、周波数帯域を一定の

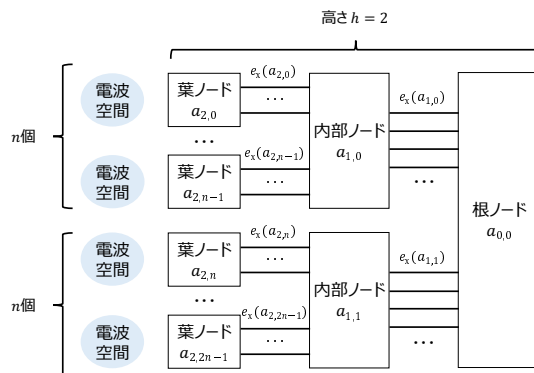


図 2: 想定する RoF ネットワークトポロジ

周波数幅に分割したチャネルを無線端末ごとに割り当てて通信する。例えば、2.4GHz 帯を利用する IEEE 802.11g においては、最も周波数の低いチャネルである ch 1 の中心周波数が 2412 MHz で帯域幅が 20 MHz, 最も周波数の高いチャネルである ch 11 の中心周波数が 2472 MHz で帯域幅が 20 MHz である。複数の無線端末が異なるチャネルを利用して同時に通信する場合を考えると、広帯域の通信に対応できる必要がある。

3 つ目は、低遅延通信の実現である。例えば、ゲーム端末間での双方向通信においては、端末間で生じる End-to-End 遅延が大きな問題となる。特にシューティングゲームに代表される非同期型のゲームでは、ネットワーク中で生じる遅延がゲームプレイヤーのパフォーマンスに影響をもたらすことが分かっている [9]。また、ロボットを利用した遠隔手術や自動運転システムなどの低遅延性が重要なアプリケーション・ユースケースを想定すると、End-to-End で遅延が 1 ms 以下であることが望ましい [10], [11]。

4 つ目は、高い周波数利用効率である。放出する電波の強度を単純に大きくするだけでも無線通信エリアを拡張することが可能である。しかしながら、電波の放出強度を大きくするほど他の無線通信を行うシステムへの干渉も大きくなるため全体の周波数利用効率が低下する。無線通信に多く使われている UHF 帯の周波数は逼迫しているため、周波数利用効率が高い手法が好ましい。

## 3. 光スイッチと電気合波回路を組み合わせたソフトウェア定義 RoF ネットワーク技術

本稿では、RoF のネットワーク化による複数電波空間の自由な相互接続を実現するため、光スイッチと電気合波回路から構成される RoF ネットワーク技術を提案する。相互接続する電波空間を適宜切り替えることで無線端末間で IP ネットワークを介さずに双方向通信できるため、伝送遅延の削減にともなう End-to-End 遅延の削減が可能となる。

図 2 に、本節で想定する RoF ネットワークトポロジを示す。本トポロジは高さ  $h = 2$  のツリー型トポロジである。深さ  $i$  ( $0 \leq i \leq h$ ) における上から  $j$  番目のノードを

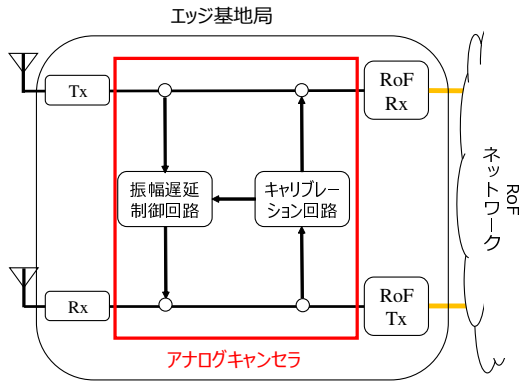


図 3: SD-RoF の葉ノードに配置するエッジ基地局の構成

$a_{i,j}$  とする。深さ  $i < h-1$  であるノード  $a_{i,j}$  は 2 台の子ノードと接続、 $a_{(h-1),j}$  のノードは  $n$  台の子ノードと接続しているものとした。本節では  $n = 2$  と仮定した。また、本節では、深さ 0 にあるノードを根ノード、深さ 1 にあるノードを内部ノード、深さ 2 にあるノードを葉ノードと呼ぶ。各葉ノードは 1 つの電波空間に対して配置されているものとした。ここで、 $e_x(a_{i,j})$  は RoF ネットワーク構成  $x$  におけるノード  $a_{i,j}$  と親ノード間に必要となる光ファイバの本数である。

### 3.1 RoF ネットワークの技術要素

提案手法では光スイッチと電気合波回路を組み合わせて RoF をネットワーク化する。本節では、技術要素である光スイッチと電気合波回路、エッジ基地局について述べる。

#### 光スイッチ

光スイッチは、光信号の経路を制御する際に使用するデバイスである。本手法では MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 光スイッチを利用する [12]。具体的には、MEMS ミラーを利用した光スイッチを内部ノードあるいは根ノードに配置することを想定する。MEMS ミラーを利用した光スイッチは 1 入力ポートから入力された光信号をスイッチ内部の MEMS ミラーが反射して対応する 1 出力ポートに出力する。光スイッチはパケットを処理しないため、入力ポートに入力された光信号の形式に関わらず、対応する出力ポートに光信号を出力する。本稿では、入力ポートと出力ポートの対応を 1 対 1 として、入力信号に対する入力ポートと出力ポートの対応関係を固定であるとする。入力信号に応じて入力ポートと出力ポートの対応を切り替える場合には数ミリ秒から数十ミリ秒の切り替え遅延が生じるため [13]、遅延が大きい。

#### 電気合波回路

電気合波回路は、入力された複数の光信号をそれぞれ電気信号に変換、複数の電気信号を合成、合成信号を光信号に変換して出力する回路である。電気合波回路を導入することによって、複数の光信号が伝送する電波を 1 光信号に集約して光ファイバ上で伝送できるため、複数電波空間の

相互接続で生じる光信号の衝突を抑制することができる。

電気合波回路は大きく分けて、RoF 送受信機、RF スイッチ回路、分配/合成器、周波数変換器、分波回路から構成される。RoF 送受信機は、光信号と RF 信号の相互変換に用いる。具体的には、RoF 送信機では RF 信号を光信号に変換、RoF 受信機では光信号を RF 信号に変換する。分配/合成器は、RF 信号の分配と合成に用いる。電気合波回路では高周波信号の分配と合成が必要なため、ウィルキンソン分配器を使用する [14]。なお、電気合波回路内で分配する RF 信号数と合成する RF 信号数は、RoF ネットワーク構成や相互接続する電波空間数によって異なる。分配する RF 信号数あるいは合成する RF 信号数が多くなる場合にはウィルキンソン分配器を多段構成にする。RF スイッチ回路は入力された複数の RF 信号から合成する RF 信号を制御するときに用いる。合成が必要となる RF 信号の組み合わせは相互接続する電波空間によって異なる。RF スイッチ回路では、分配した RF 信号を接続する合成器を切り替えることで合成する RF 信号を自由に制御できるようにする。周波数変換器は各 RF 信号を周波数変換するときに用いる。周波数変換器においては、入力された RF 信号を直交復調器で I/Q 信号に変換した後に再び直交変調器で任意の周波数に変調することで周波数変換を実現する。電気合波回路では複数の RF 信号を合成する前に、エッジ基地局ごとに事前割り当てした周波数に各 RF 信号を変換する。周波数変換は電気合波回路を多段接続するときに必要となる。電気合波回路を多段接続するとき、1 段目の電気合波回路で合成した各エッジ基地局の RF 信号を 2 段目の電気合波回路で再びエッジ基地局ごとの RF 信号に分離する必要がある。エッジ基地局間で周波数を変更しない場合、2 段目の電気合波回路で合成後の RF 信号から各エッジ基地局に対応する RF 信号を取り出すことが困難である。分波回路は合成した RF 信号の分離に用いる。合成した RF 信号を分波回路に入力すると分配器で複数の RF 信号に分配される。分配された各 RF 信号は、直交復調器を経て I/Q 信号に変換された後にフィルタ回路で取り出す周波数以外の信号成分が除去される。フィルタ回路から出力された I/Q 信号は直交変調器を経て RF 信号として出力される。

#### エッジ基地局

エッジ基地局は、SD-RoF における葉ノードに配置して「光ファイバ無線双方向パススルー技術」の機能によって電波空間と SD-RoF を接続する役割を持つ。エッジ基地局の送受信アンテナは、それぞれ上り方向と下り方向に設置した 2 つの RoF によって RoF ネットワークと接続する。しかしながら、送受信アンテナをそのまま RoF ネットワークに接続するとエッジ基地局の送信アンテナが送信する電波を受信アンテナで受信する自己干渉が生じるため、信号のループが発生する。



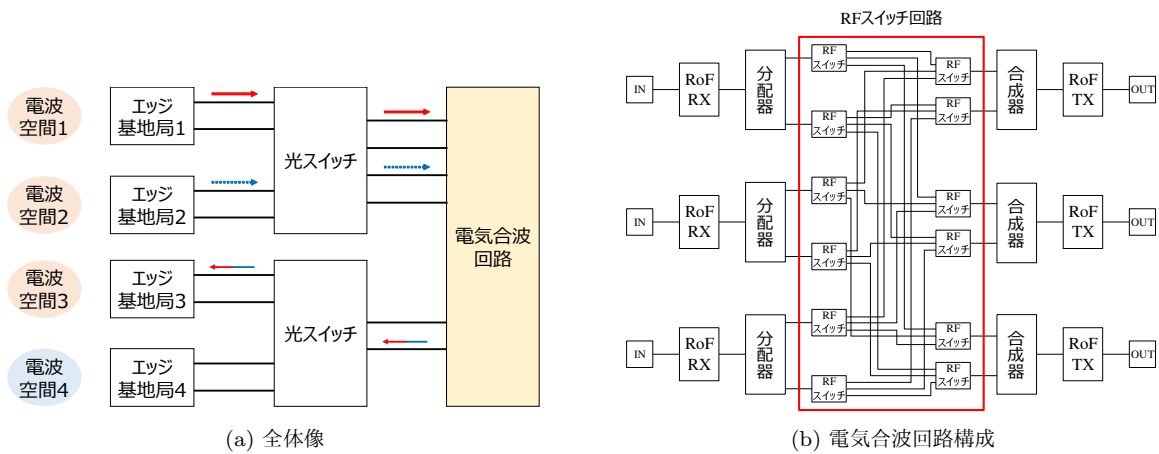


図 4: 電気合波回路コア集約 RoF ネットワーク

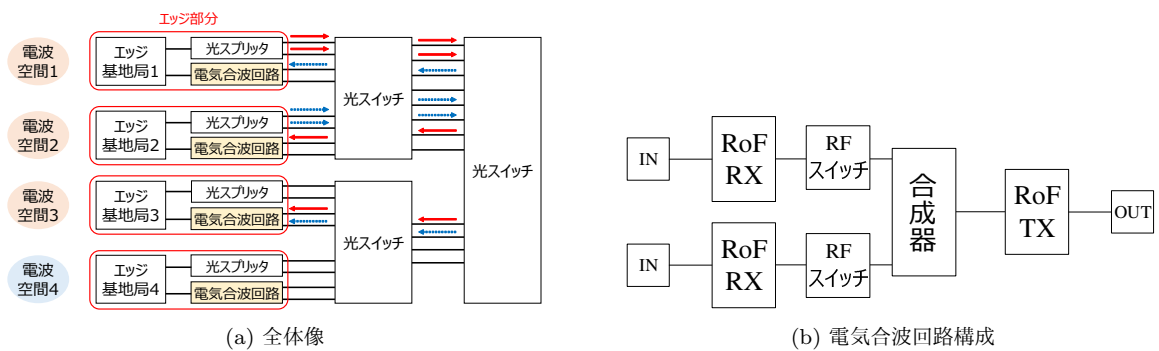


図 5: 電気合波回路エッジ分散 RoF ネットワーク

本手法では、エッジ基地局に振幅遅延制御回路を用いたアナログキャンセラを具備することで自己干渉による信号のループを解消する [7]。図 3 に SD-RoF の葉ノードに配置するエッジ基地局の構成を示す。本エッジ基地局構成においては、エッジ基地局の送受信アンテナの間にアナログキャンセラを挿入する。アナログキャンセラはエッジ基地局の送信アンテナが送信する信号を入力として逆位相同振幅の信号を生成する。生成した逆位相同振幅の信号を受信アンテナで受信した自己干渉信号に重畳することで自己干渉信号の除去を実現する。

### 3.2 RoF ネットワーク構成

#### 光スイッチのみを用いた RoF ネットワーク

RoF の単純なネットワーク化として光スイッチのみを用いた RoF ネットワークを考える。具体的には、図 2 における内部ノードおよび根ノードに光スイッチを配置した RoF ネットワークを想定する。各エッジ基地局は光スイッチを介して任意の別地点のエッジ基地局と双方向通信できる。しかしながら、3 地点以上のエッジ基地局を相互接続することはできない。

例えば、図 2 のトポロジにおいて電波空間 1、電波空間 2、電波空間 3 を相互接続することを考える。このとき、電波空間 1 は電波空間 2 と電波空間 3 から送信された RF 信

号を同時受信する必要がある。まず、葉ノード  $a_{2,1}$  に配置したエッジ基地局と葉ノード  $a_{2,2}$  に配置したエッジ基地局は受信した RF 信号を光信号に変換して葉ノード  $a_{2,0}$  に配置したエッジ基地局に送信する。葉ノード  $a_{2,1}$  に配置したエッジ基地局の光信号は内部ノード  $a_{1,0}$  に配置した光スイッチを介して葉ノード  $a_{2,0}$  に配置したエッジ基地局と接続する光ファイバに伝送される。同様に、葉ノード  $a_{2,2}$  に配置したエッジ基地局の光信号は内部ノード  $a_{1,1}$ 、根ノード、内部ノード  $a_{1,0}$  に配置した光スイッチを介して葉ノード  $a_{2,0}$  に配置したエッジ基地局と接続する光ファイバに伝送される。このとき、各光信号は同波長であるため、光ファイバ上で光信号の衝突が発生して通信をすることができない。

#### 電気合波回路コア集約 RoF ネットワーク

電気合波回路コア集約 RoF ネットワークとは、電気合波回路をコア側に配置した RoF ネットワーク構成である。図 4 (a) に電気合波回路コア集約 RoF ネットワークの一例を示す。各エッジ基地局は、光スイッチに対して光ファイバで接続する。光スイッチは根ノードに配置された電気合波回路と接続する。本 RoF ネットワーク構成では電気合波機能を一局に集中することで管理やアップデートにかかるコストの低減が見込まれる。図 4 (b) に根ノードに配置

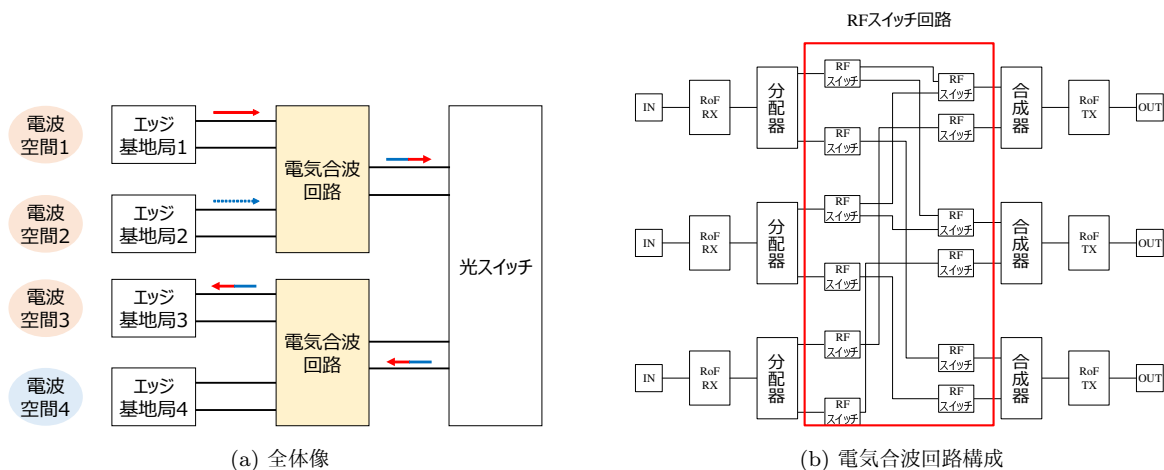


図 6: 電気合波回路リレー分散 RoF ネットワーク

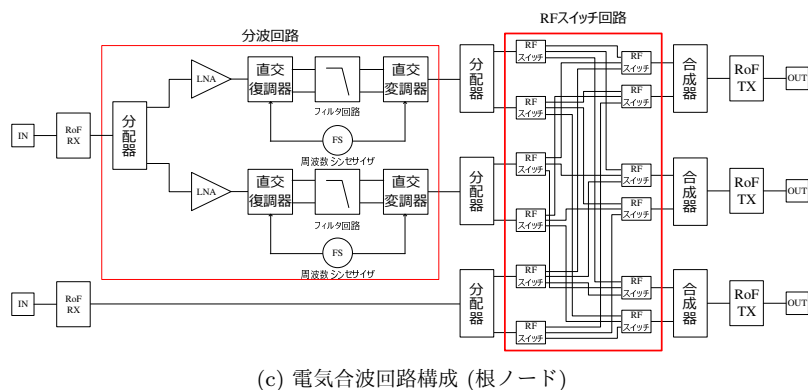
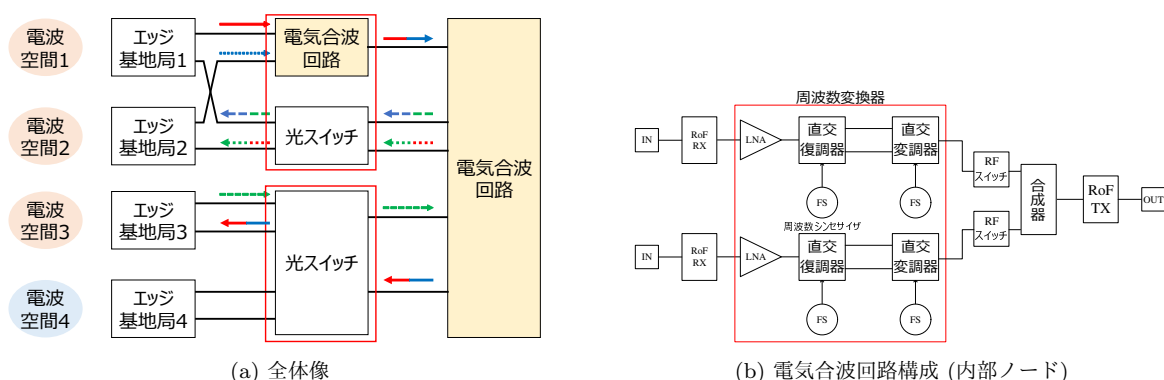


図 7: 電気合波回路コア・リレー複合 RoF ネットワーク

した電気合波回路の一構成を示す。本構成では 3 電波空間の相互接続を想定している。電気合波回路を多段接続する必要がないことから本構成の電気合波回路は周波数変換器を必要としない。

図 4 (a) において、電波空間 1、電波空間 2 から送信された RF 信号を電波空間 3 に伝送して相互接続を実現する場合の RF 信号の流れを述べる。エッジ基地局 1 およびエッジ基地局 2 は電波空間 1 および電波空間 2 から受信した RF 信号をそれぞれ波長  $\lambda$  の光信号に変換する。それぞれの光信号は光スイッチを介して根ノードに配置された電気合波回路に送信され、電気合波回路上の RoF 受信機でそれ

ぞれ RF 信号に変換される。2 つの RF 信号は分配器・RF スイッチ回路を経て共通の合成器に入力されて 1 つの RF 信号に合成される。合成された RF 信号は電気合波回路上の RoF 送信機で光信号として出力される。エッジ基地局 3 は出力された光信号を受信して RF 信号に変換する。変換した RF 信号を電波空間 3 に送信することで電波空間 1 および電波空間 2 と相互接続できる。

#### 電気合波回路エッジ分散 RoF ネットワーク

電気合波回路エッジ分散 RoF ネットワークとは、各エッジ基地局に電気合波回路を配置した RoF ネットワーク構

成である。図 5 (a) に電気合波回路エッジ分散 RoF ネットワークを示す。光スプリッタは、光信号を分配するために用いられる光受動部品である [15]。エッジ側では受信アンテナから受信した RF 信号を RoF 送信機で光信号に変換した後、光スプリッタで複数の光信号に分配して他のエッジ基地局に光信号を送信する。光スプリッタの分配数は相互接続する電波空間数に応じて変化する。また、相互接続する他のエッジ基地局から複数の光信号を受信したときは電気合波回路で RF 信号に変換して 1 つの RF 信号に合成する。合成した RF 信号は RoF 送信機で光信号に変換された後にエッジ基地局に送信される。この光信号はエッジ基地局の RoF 受信機で RF 信号に変換された後に、送信アンテナから電波空間内の無線端末に対して送信される。エッジ基地局に電気合波回路を配置することで、コア部分を介することなく複数電波空間の相互接続を制御できる。図 5 (b) にエッジ基地局に配置する電気合波回路の構成を示す。本構成では 3 電波空間の相互接続を想定している。電気合波回路を多段接続する必要がないことから本構成の電気合波回路は周波数変換器を必要としない。

図 5 (a) に、電気合波回路エッジ分散 RoF ネットワークにおいて電波空間 1、電波空間 2 の RF 信号を電波空間 3 に伝送するまでの流れを述べる。電気合波回路コア集約 RoF ネットワークと同様に、エッジ基地局 1 とエッジ基地局 2 はそれぞれ RF 信号を波長  $\lambda$  の光信号に変換する。各光信号は光スプリッタで 2 つの光信号に分配して、そのうち 1 つをエッジ基地局 3 と接続する電気合波回路に送信する。電気合波回路は、2 つの入力光信号を RoF 送信機でそれぞれ RF 信号に変換したあと、RF スイッチ回路・合成器を経て 1 つの RF 信号に合成する。合成された RF 信号は電気合波回路上の RoF 送信機で光信号として出力される。エッジ基地局 3 は出力された光信号を受信して RF 信号に変換する。変換した RF 信号を電波空間 3 に送信することで電波空間 1 および電波空間 2 と相互接続できる。

#### 電気合波回路リレー分散 RoF ネットワーク

電気合波回路リレー分散 RoF ネットワークとは、内部ノードに電気合波回路を配置した RoF ネットワーク構成である。図 6 (a) に電気合波回路リレー分散 RoF ネットワークの一例を示す。内部ノードに配置した電気合波回路で複数の光信号を 1 光信号に合波するため、必要な光ファイバの本数や光スイッチの入出力ポート数を低減できる。図 6 (b) に各内部ノードに配置する電気合波回路構成を示す。内部ノードに配置した電気合波回路は子ノードであるエッジ基地局および親ノードである光スイッチに対してそれぞれ光信号を出力する。図 6 (b) においては、子ノードである各エッジ基地局が出力した光信号を上 2 つの入力ポートに、親ノードである光スイッチが出力した光信号を残った入力ポートに入力する。また、上 2 つの出力ポートが出

力した光信号を子ノードである各エッジ基地局に、下 1 つの出力ポートが出力した光信号を親ノードである光スイッチに入力する。あるエッジ基地局に対する光信号の合波には、他のエッジ基地局から入力された光信号と光スイッチから入力された光信号を利用する。一方で、光スイッチに対する光信号の合波には、入力された全エッジ基地局の光信号のうち、共通の相互接続グループに属するエッジ基地局の光信号を利用する。

図 6 (a) に、電気合波回路リレー分散 RoF ネットワークにおいて電波空間 1、電波空間 2 の RF 信号を電波空間 3 に伝送するまでの流れを述べる。エッジ基地局 1 およびエッジ基地局 2 で波長  $\lambda$  に変換された 2 つの光信号はその親ノードに配置された電気合波回路で RoF 受信機・分配器・RF スイッチ回路・合成器・RoF 送信機を経て 1 つの光信号に合波される。合波後の光信号は光スイッチ・電気合波回路を経てエッジ基地局 3 に送信される。この例の場合、2 度目の電気合波回路の役割は「何もしない」と等価である。エッジ基地局 3 は受信した光信号を RF 信号に変換して電波空間 1 および電波空間 2 との相互接続を実現する。

#### 電気合波回路コア・リレー複合 RoF ネットワーク

電気合波回路コア・リレー複合 RoF ネットワークとは、根ノードにコア電気合波回路、内部ノードに電気合波回路と光スイッチを配置した RoF ネットワークである。図 7 (a) にツリー型の電気合波回路コア・リレー複合 RoF ネットワークの一例を示す。また、図 7 (b) には内部ノードに配置する電気合波回路の一構成、図 7 (c) には根ノードに配置する電気合波回路の一構成を示す。内部ノードの電気合波回路は、エッジ基地局から受け取った光信号を RoF 受信機で RF 信号に変換した後、エッジ基地局ごとに規定した周波数に変換する。RF スイッチ回路を経て合成器で合成された信号は RoF 送信機で光信号に変換して根ノードの電気合波回路に送出される。根ノードの電気合波回路に対しては内部ノードに配置した電気合波回路で合波した光信号が入力される。電波空間の相互接続に必要な電気合波処理は全て根ノードの電気合波回路で行うため、合成後の RF 信号から元の複数 RF 信号を取り出す必要がある。分波器は、合成後の RF 信号を周波数ごとに分波することで合成後の RF 信号から元の RF 信号を取り出す処理を実現する。

図 7 (a) に、電気合波回路コア・リレー複合 RoF ネットワークにおいて電波空間 1、電波空間 2 の RF 信号を電波空間 3 に伝送するまでの流れを述べる。これまでと同様に、エッジ基地局 1 とエッジ基地局 2 は受信した RF 信号を波長  $\lambda$  の光信号に変換する。内部ノードに配置した電気合波回路は各光信号をそれぞれ異なる周波数の RF 信号に変換してから 1 つの RF 信号に合成する。具体的には、電波空間 1 に対応する RF 信号を周波数  $f_1$ 、電波空間 2 に

表 1: RoF ネットワークに属する  $N$  台のエッジ基地局同士で相互接続可能な電波空間数

RoF ネットワーク構成	相互接続可能な電波空間数
光スイッチのみ	2
電気合波回路 + 光スイッチ	$N$

対応する RF 信号を周波数  $f_2$  に変換する．根ノードに配置した電気合波回路は合成された RF 信号を受信して分波器に入力する．分波器は RF 信号を分配器で 2 つの RF 信号に分配するとともに，一方を周波数  $f_1$  のフィルタ回路，もう一方を周波数  $f_2$  のフィルタ回路に入力することで電波空間 1 および電波空間 2 から受信した RF 信号を分離する．その後，分離した各 RF 信号は分配器・RF スイッチ回路・合成器・RoF 送信機を経て 1 つの光信号としてエッジ基地局 3 に送信される．エッジ基地局 3 は受信した光信号を RF 信号に変換して，同様に，電波空間 1 および電波空間 2 との相互接続を実現する．

#### 4. 複数電波空間の相互接続性評価

電気合波回路の導入が複数電波空間の相互接続性能にもたらす影響を評価するために，図 2 に示したツリー型トポロジを元に相互接続可能な電波空間数，RoF ネットワーク構成ごとに必要となる光ファイバ数について解析した．図 2 に示したとおり，ツリー型トポロジの高さは  $h \geq 1$  とする．なお， $h = 1$  の場合はスター型トポロジとなる．本トポロジに参加するエッジ基地局数は  $2^{h-1} \cdot n$  となる．

##### 4.1 相互接続可能な電波空間数

光スイッチのみを用いた RoF ネットワーク構成と光スイッチと電気合波回路を組み合わせた RoF ネットワーク構成における相互接続可能な電波空間数について解析した．表 1 に RoF ネットワークに属するエッジ基地局のうち， $N$  台のエッジ基地局同士で相互接続可能な電波空間数を示す．なお， $N$  が取り得る値は  $2 \leq N \leq 2^{h-1} \cdot n$  である．また，RoF ネットワークを構成する光ファイバ，光スイッチ，電気合波回路の制約は考慮しないものとする．

光スイッチのみを用いた RoF ネットワーク構成では，最大 2 つの電波空間を相互接続することが可能である．2 電波空間を相互接続する場合，1 つのエッジ基地局に対して光信号を送信するエッジ基地局は常に 1 つであるため，光ファイバ上で光信号の衝突は発生しない．一方で，3 電波空間以上を相互接続する場合，1 台のエッジ基地局に対して 2 台以上のエッジ基地局から光信号が伝送される．このとき，光ファイバ上で光信号同士の衝突が発生する．

光スイッチと電気合波回路を組み合わせた RoF ネットワーク構成の場合，相互接続可能な電波空間数は  $N$  となる．1 台のエッジ基地局に対して， $N - 1$  台のエッジ基地局から光信号を伝送する場合でも，電気合波回路を用いて

1 つの光信号に合波することで光信号の衝突を抑制する．

##### 4.2 各 RoF ネットワーク構成の光ファイバ数

4.1 節では，電気合波回路の導入によって複数電波空間を相互接続可能な RoF ネットワークが実現できることを評価した．本節では，電気合波回路を導入した各 RoF ネットワーク構成における差異を評価するために，図 2 に示したツリー型トポロジを元にして各 RoF ネットワーク構成に必要な光ファイバ数を解析した．評価軸に光ファイバ数を用いたのは，RoF ネットワーク全体のコストを包括的に表す指標として適していると考えたためである．

ここで，RoF ネットワークを介した相互接続グループ数が  $K$  であるとき，相互接続グループの集合を  $G = \{G_1, G_2, \dots, G_K\}$  とする．各相互接続グループ  $G_k$  にはエッジ基地局が少なくとも 2 台以上属するものとする．また，各エッジ基地局は複数の相互接続グループに同時に属することはないものとする．あるノード  $a_{i,j}$  の子孫となるエッジ基地局が属している相互接続グループの集合を  $G(a_{i,j})$  とする． $G(a_{i,j})$  に含まれる各相互接続グループ  $G_k \in G(a_{i,j})$  について，グループに属するエッジ基地局  $a_{h,j} \in G_k$  が  $a_{i,j}$  の子孫だけで構成されない相互接続グループの個数を  $f(G(a_{i,j}))$  とする．また， $G_k$  に属するエッジ基地局のうち， $a_{i,j}$  の子孫であるエッジ基地局数を  $d_{a_{i,j}}(G_k)$ ，子孫でない要素数を  $d'_{a_{i,j}}(G_k)$  とする．

##### 解析結果

各 RoF ネットワーク構成  $x$  で必要となる光ファイバ数  $F_x$  は以下の式にしたがう．

$$F_x = \sum_{i=0}^{h-1} \sum_j e_x(a_{i,j}) \quad (1)$$

ここで， $e_x(a_{i,j})$  は RoF ネットワーク構成  $x$  におけるノード  $a_{i,j}$  と親ノード間に必要となる光ファイバの本数である．ただし， $e_x(a_{0,0}) = 0$  とする．各 RoF ネットワーク構成における光ファイバの本数  $e_x(a_{i,j})$  は以下の式 (2) にしたがう．

式 (2) より，電気合波回路コア集約 RoF ネットワークおよび電気合波回路コア・リレー複合 RoF ネットワークは相互接続グループ  $G$  の構成に関わらず，必要な光ファイバの本数が決定する．一方で，電気合波回路エッジ分散 RoF ネットワークおよび電気合波回路リレー分散 RoF ネットワークは相互接続グループ  $G$  がどのように構成されるかにしたがって必要な光ファイバの本数が決定する．

##### シミュレーション結果

RoF ネットワークに属するエッジ基地局同士の相互接続関係が各 RoF ネットワーク構成における光ファイバ本数にもたらす影響をシミュレーション評価した．本評価では  $n = 4$  に固定するとともに，各相互接続グループには  $N$  台のエッジ基地局が参加するものとした．各相互接続グループ



$$e_{\text{core}}(a_{i,j}) = \begin{cases} 2 & (i = h) \\ 2^{h-i} \cdot n & (1 \leq i \leq h-1) \end{cases} \quad e_{\text{edge}}(a_{i,j}) = \begin{cases} 2(N-1) & (i = h) \\ 2 \sum_{k=1}^{|G(a_{i,j})|} d_{a_{i,j}}(G_k) \cdot d'_{a_{i,j}}(G_k) & (1 \leq i \leq h-1) \end{cases}$$

$$e_{\text{relay}}(a_{i,j}) = \begin{cases} 2 & (i = h) \\ 2f(G(a_{i,j})) & (1 \leq i \leq h-1) \end{cases} \quad e_{\text{hybrid}}(a_{i,j}) = \begin{cases} 2 & (i = h) \\ 1 + 2^{h-i-1} \cdot n & (1 \leq i \leq h-1) \end{cases} \quad (2)$$

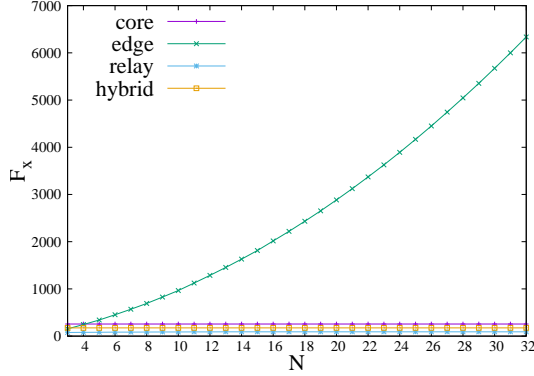


図 8: 相互接続するエッジ基地局数  $N$  に対する光ファイバ数の変化

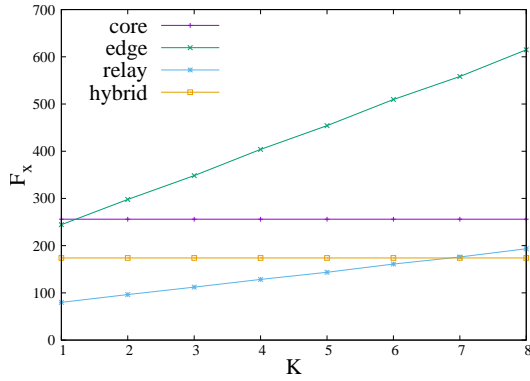


図 9: 相互接続グループ数  $K$  に対する光ファイバ数の変化

に参加するエッジ基地局は RoF ネットワークに属する全  $2^{h-1} \cdot n$  台のエッジ基地局から一様分布で決定するものとした。各シミュレーション結果としてシミュレーション 100 回の平均値を採用した。なお、図 8 から図 11 に示した core, edge, relay, hybrid とはそれぞれ電気合波回路コア集約 RoF ネットワーク、電気合波回路エッジ分散 RoF ネットワーク、電気合波回路リレー分散 RoF ネットワーク、電気合波回路コア・リレー複合 RoF ネットワークにおける光ファイバ本数を表している。

まず、相互接続するエッジ基地局数が各 RoF ネットワーク構成における光ファイバ本数にもたらす影響を評価した。ここで、相互接続グループ数  $K$  は 1 とした。図 8 に、相互接続するエッジ基地局数  $N$  に対する各 RoF ネットワーク構成に必要な総光ファイバ数  $F_x$  を示す。ここで、高さ  $h$  は 4 とする。評価結果から次の 3 つのことが分かる。

- 電気合波回路コア集約 RoF ネットワークと電気合波回路コア・リレー複合 RoF ネットワークでは必要となる光ファイバ数が一定であること
- 電気合波回路エッジ分散 RoF ネットワークでは  $N$  の

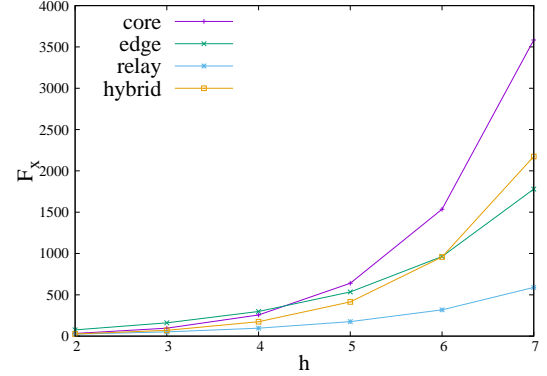


図 10: 高さ  $h$  に対する光ファイバ数の変化。 $K = 2$  のとき

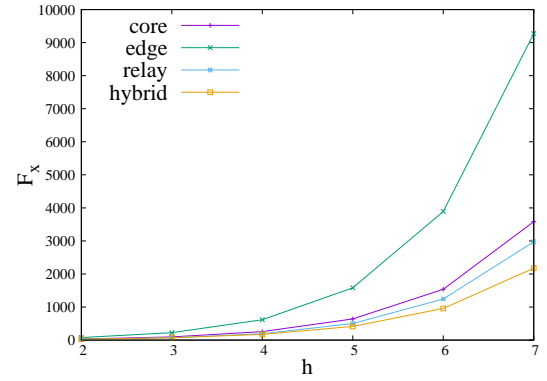


図 11: 高さ  $h$  に対する光ファイバ数の変化。 $K = (2^{h-1} \cdot n)/N$  のとき

増加に対して必要となる光ファイバ数が非線形に増加すること

- 電気合波回路リレー分散 RoF ネットワークは最も光ファイバ本数を必要とせず、 $N$  の増加に対して必要となる光ファイバ数の変化が小さいこと

以上の結果から、電気合波回路リレー分散 RoF ネットワークがより少ない光ファイバ数で多くの電波空間を同時に相互接続できることが分かった。

次に、RoF ネットワーク内に複数の相互接続グループ数が存在するとき、光ファイバ数にもたらす影響を評価した。ここで、各相互接続グループに属するエッジ基地局の台数  $N$  は 4 とした。図 9 に相互接続グループ数  $K$  に対する各 RoF ネットワーク構成に必要な総光ファイバ数  $F_x$  を示す。ここで、高さ  $h$  は 4 とする。図 8 における結果と同様に、電気合波回路コア集約 RoF ネットワークおよび電気合波回路コア・リレー複合 RoF ネットワークで必要となる光ファイバ数は一定となった。一方で、電気合波回路エッジ分散 RoF ネットワークと電気合波回路リレー分散 RoF ネットワークにおいては相互接続グループ数の増加

とともに必要となる光ファイバ数が線形に増加した。RoF ネットワーク内で複数のグループがそれぞれ相互接続をしているとき、そのグループ数にしたがって電気合波回路リレー分散 RoF ネットワークで必要となる光ファイバ数と電気合波回路コア・リレー複合 RoF ネットワークおよび電気合波回路コア集約 RoF ネットワークで必要となる光ファイバ数との差異が小さくなることが分かった。

最後に、RoF ネットワークに属するエッジ基地局台数が各 RoF ネットワーク構成の光ファイバ数にもたらす影響を評価した。図 9 と同様に、各相互接続グループに属するエッジ基地局の台数  $N$  は 4 とした。図 10 および図 11 にツリー型トポロジの高さ  $h$  に対する各 RoF ネットワーク構成で必要な総光ファイバ数  $F_x$  を示す。なお、図 10 では相互接続グループ数  $K$  を 2、図 11 では相互接続グループ数  $K$  を  $(2^{h-1} \cdot n)/N$  とした。評価結果から以下の 4 つのことが分かる。

- 相互接続グループ数が少ないとき、電気合波回路リレー分散 RoF ネットワークがより少ない光ファイバ本数で複数電波空間を接続できること
- RoF ネットワークに属するエッジ基地局数の増加とともに電気合波回路コア・リレー複合 RoF ネットワークおよび電気合波回路コア集約 RoF ネットワークで必要となる光ファイバ数が増大すること
- 相互接続グループ数が多くなると、電気合波回路エッジ分散 RoF ネットワークで必要となる光ファイバ数は劇的に増大すること
- 相互接続グループ数が多くなったとき、残り 3 構成で必要となる光ファイバ数の差異は小さくなること

以上の評価結果から、RoF ネットワークの規模が大きい場合でも、相互接続するグループ数が少ないときには電気合波回路リレー分散 RoF ネットワークを用いることで光ファイバの本数を削減できると考えられる。

## 5. おわりに

本稿では、複数の電波空間に属する無線端末間で広帯域・低遅延を達成しつつ双方向通信を実現するために、光スイッチと電気合波回路を組み合わせたソフトウェア定義 RoF ネットワーク技術を提案した。評価結果から、光スイッチのみを用いた RoF ネットワークと比較して電気合波回路を組み合わせた RoF ネットワークがより多くの電波空間を相互接続できることが示された。また、複数の電波空間を相互接続するとき、RoF ネットワーク構成ごとに必要となる光ファイバ数が大きく異なることを示した。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP19H01101, JP18H03231) の支援の下で行った。

## 参考文献

- [1] R. Shea, J. Liu, E.C.H. Ngai, and Y. Cui, "Cloud gaming: architecture and performance," *IEEE Network*, vol.27, no.4, pp.16–21, 2013.
- [2] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol.17, no.4, pp.2347–2376, Fourthquarter 2015.
- [3] S. Pandi, F.H.P. Fitzek, C. Lehmann, D. Nophut, D. Kiss, V. Kovacs, A. Nagy, G. Csorvasi, M. Toth, T. Rajacsis, H. Charaf, and Liebhart, "Joint Design of Communication and Control for Connected Cars in 5G Communication Systems," *IEEE GLOBECOM Workshops*, pp.1–7, Dec. 2016.
- [4] A.H. Sodhro, A.K. Sangaiah, S. Pirphulal, A. Sekhari, and Y. Ouzrout, "Green media-aware medical IoT system," *Multimedia Tools and Applications*, vol.78, no.3, pp.3045–3064, 2019.
- [5] E. Frachtenberg, "Practical Drone Delivery," *Computer*, vol.52, no.12, pp.53–57, Dec. 2019.
- [6] M. Peng, Y. Sun, X. Li, Z. Mao, and C. Wang, "Recent advances in cloud radio access networks: System architectures, key techniques, and open issues," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol.18, no.3, pp.2282–2308, March 2016.
- [7] 石岡卓将, 福井達也, 成川 聖, 桐原誉人, 南 勝也, 池田智, 椎名亮太, 木下和彦, 木崎一廣, 猿渡俊介, 渡辺 尚, "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, 福島県磐梯熱海温泉華の湯 (福島県郡山市), July 2019.
- [8] B.P. Crow, I. Widjaja, J.G. Kim, and P.T. Sakai, "IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol.35, no.9, pp.116–126, Sept. 1997.
- [9] 本生崇人, 川崎慈英, 藤橋卓也, 猿渡俊介, 渡辺 尚, "プレイヤパフォーマンス低下を抑制するオンラインゲーム向け推定技術に関する一検討," 第 82 回情報処理学会全国大会, pp.1–2, オンライン開催, March 2020.
- [10] P. Schulz, M. Matthe, H. Klessig, M. Simsek, G. Fettweis, J. Ansari, S.A. Ashraf, B. Almeroth, J. Voigt, I. Riedel, A. Puschmann, A. Mitschele-Thiel, M. Muller, T. Elste, and M. Windisch, "Latency Critical IoT Applications in 5G: Perspective on the Design of Radio Interface and Network Architecture," *IEEE Communications Magazine*, vol.55, no.2, pp.70–78, Feb. 2017.
- [11] M. Simsek, A. Aijaz, M. Dohler, J. Sachs, and G. Fettweis, "5G-enabled Tactile Internet," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.34, no.3, pp.460–473, March 2016.
- [12] 山口城治, "MEMS 光スイッチ," *精密工学会誌*, vol.76, no.5, pp.514–517, 2010.
- [13] M. Hirono, T. Sato, J. Matsumoto, S. Okamoto, and N. Yamanaka, "HOLST: Architecture design of energy-efficient data center network based on ultra High-speed Optical Switch," *IEEE International Symposium on Local and Metropolitan Area Networks*, pp.1–6, 2017.
- [14] C.M. Lin, H.H. Su, J.C. Chiu, and Y.H. Wang, "Wilkinson Power Divider Using Microstrip EBG Cells for the Suppression of Harmonics," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol.17, no.10, pp.700–702, 2007.
- [15] A. Aratake, "High Reliability of Silica-Based  $1 \times 8$  Optical Splitter Modules for Outside Plant," *Journal of Lightwave Technology*, vol.34, no.2, pp.227–232, 2016.