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¹ 椎名 亮太² 福井 達也² 成川 聖² 南 勝也² 石岡 卓将¹ 藤橋 卓也¹ 猿渡 俊介¹ 渡辺 尚¹

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が検討されてい 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

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科

² 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・ 無線送受信機の関係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



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 帯の周波数はひっ迫しているため、 周波数利用効率が高い手法が好ましい.

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 ($0 \le i \le h$) 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 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入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

— 254 —

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20 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信号を波長入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λ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 λ 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 $h \ge 1$ 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 $2 \le N \le 2^{h-1} \cdot n$ 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 に必要となる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 = $\{G_1, G_2, ..., G_K\}$ 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.

$$F_{\rm x} = \sum_{i=0}^{h-1} \sum_{j} e_{\rm x}(a_{i,j}) \tag{1}$$

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

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



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

プ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}・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 ク構成で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 ネットワーク構成で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

- 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 energyefficient 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 × 8 Optical Splitter Modules for Outside Plant," Journal of Lightwave Technology, vol.34, no.2, pp.227–232, 2016.