

SD-RoF ネットワークの設計と実装

相浦 一樹¹ 石岡 卓将¹ 椎名 亮太² 福井 達也² 谷口 友宏² 成川 聖² 南 勝也² 木崎 一廣¹
藤橋 卓也¹ 渡辺 尚¹ 猿渡 俊介¹

概要: 筆者らは、プロトコルフリー、大容量性、低遅延性を同時に実現する新たな無線アクセスネットワークアーキテクチャとしてこれまでに「SD-RoF (Software-Defined Radio over Fiber)」を提案している。SD-RoF は、SD-RoF スイッチと SD-RoF エッジで構築された SD-RoF ネットワーク、SD-RoF ネットワークの接続を切り替える SD-RoF コントローラ、無線送受信機を組み合わせることで低遅延性・広帯域性を有する Radio over Fiber (RoF) のネットワーク化を目指している。本稿では、その 1 構成要素である光スイッチと電気スイッチを組み合わせた SD-RoF ネットワークを提案する。多様なサービスに対して広帯域性・低遅延性を保証するために、SD-RoF ネットワークではユーザの要求に応じて光パスである RoF 経路を適応的に割り当てることが重要となる。これを実現するために、筆者らは elastic RoF module を設計・実装した。Elastic RoF module は特殊で高価なデバイスが必要となる光領域での周波数変換および合波を電気領域で実施することで、RoF 経路の適応的な割り当てを安価に実現する。実機実装を通して周波数 2.4–2.5 GHz において、帯域幅 20 MHz の無線信号の周波数変換・合波を実現する elastic RoF module を約 10 万円で実装できることがわかった。また、実機実験から elastic RoF module の導入による無線通信性能 (Carrier to Noise Ratio: CNR) の劣化量は約 10 dB 程度となることがわかった。

1. はじめに

Internet of Things (IoT) 技術の発展に起因して、次世代の無線アクセスネットワークでは低遅延性・広帯域性・最低限のプロトコルフリー性が必要とされている。例えば、遠隔手術・遠隔診療 [1]、ネットワーク経由でのドローン・ロボットの制御 [2] [3] などのアプリケーションでは、遠隔の無線デバイスを精密に制御・協調させることが求められる。無線通信システムを経由して伝送されてきた視覚情報を見ながら、遠隔のモノや機械を制御・協調させる場合、視覚情報と制御情報を双方向伝送するための広帯域性と End-to-End で 1 ms の低遅延性を同時に達成する必要がある [4]。また、既存の無線デバイスにおいては、2.4 GHz 帯だけでも WiFi, Bluetooth, ZigBee など多様な方式が既に利用されているため、これらの方式を変更せずそのまま利用できることが望ましい。

このような観点から、筆者らは広帯域性、低遅延性、プロトコルフリーの 3 つを実現する無線アクセスネットワークとして SD-RoF [5] を提案している。SD-RoF は現在の IP (Internet Protocol) で構築されたワイヤレスアクセスネットワークを光スイッチと電気スイッチを組み合わせた

SD-RoF ネットワークで置き換える技術である。図 1 (a) に SD-RoF の全体像を示す。SD-RoF は、SD-RoF スイッチと SD-RoF エッジで構築された SD-RoF ネットワーク、SD-RoF ネットワークの接続を切り替える SD-RoF コントローラ、無線送受信機を組み合わせることで Radio over Fiber (RoF) をネットワーク化する。RoF はある地点の無線信号を光ファイバを用いて別の地点に伝送することで低遅延性・広帯域性を保証する。近年の Radio Access Network (RAN) では、各基地局から固定的に接続された RoF を収容局に集約することで無線通信機能を一括で制御する。これに対して SD-RoF では、RoF をネットワーク化して通信経路自体の制御を行うことで、より柔軟性の高い無線アクセスネットワークを構築する。また、SD-RoF では、アナログ RoF を用いて電気信号を直接的に光信号に変換することで、低遅延かつ広帯域な無線信号の伝送を実現する。SD-RoF による柔軟性の高い無線アクセスネットワークの実現はユーザに対して elastic wireless service 機能、無線双方向パススルー機能を提供することにつながる。

Elastic wireless service とはユーザが必要な機能を有したワイヤレスサービスをいつでもどこでも提供する機能である。図 1 (b) に elastic wireless service 機能の一例として、電波空間 α にワイヤレスサービスを提供する場合を考える。SD-RoF コントローラは制御コマンドを用いて無

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

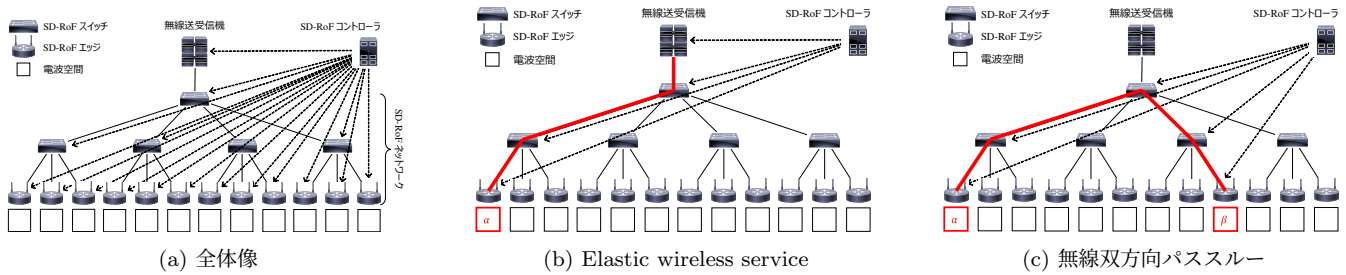


図 1: SD-RoF の全体像と elastic wireless service 機能および無線双方向パススルー機能の一例

線送受信機と SD-RoF エッジ α との間に RoF 経路を構築する。ユーザは任意の電波空間において必要なワイヤレスサービスを瞬時に構築できるため、次世代の無線アクセスネットワークで求められる多様性に対応することができる。無線双方向パススルーとは、異なる場所に存在する 2 地点間を RoF を介して電波的に接続することでそれぞれの地点にあるデバイスが他方のデバイスと双方向で無線通信を可能とする技術である。

図 1 (c) に無線双方向パススルー機能を用いて電波空間 α と電波空間 β を相互接続する場合の例を示す。本機能を利用することで 1) 複数電波空間の相互接続、2) アナログ RoF による数 GHz の帯域を利用した広帯域相互無線伝送、3) IP ネットワークに起因する伝送遅延・処理遅延の削減を達成できる。

本稿では SD-RoF における elastic wireless service 機能と無線双方向パススルー機能の実現を目指して、SD-RoF の 1 構成要素である SD-RoF ネットワークを提案する。より具体的には、サービスに応じて適応的に通信経路を制御可能な RoF ネットワークを実現するために光スイッチと電気スイッチを密結合する機能を担う elastic RoF module を実装した。通常、RoF ネットワークにおいて通信経路を適応的に制御するためには、高価なデバイスを用いた光領域での周波数変換および複数光信号の合波が必要となる。Elastic RoF module では光信号を電気信号に変換して周波数変換および複数信号の合波を電気領域で実施することで、適応的な通信経路制御を安価に実現することが可能となる。Elastic RoF module のプロトタイプ実装を通じて周波数 2.4 GHz–2.5 GHz、帯域幅 20 MHz の無線信号を対象とした周波数変換および合波機能を実現する elastic RoF module を約 10 万円で実装できることが分かった。また、実装した elastic RoF module を用いた実機実験から 1) 周波数変換器による Carrier to Noise Ratio (CNR) の劣化量は 10 dB 程度であること、2) 電波伝搬距離が 3 m 以上となったとき、周波数変換器による CNR の劣化量はほぼ無視できること、3) 合波による CNR への影響は大きくないことが明らかとなった。

本稿の構成は以下のとおりである。2 節で SD-RoF の関

連研究について述べる。3 節で SD-RoF の構成要素である SD-RoF スイッチ、SD-RoF エッジ、elastic RoF module について詳細に述べる。4 節では SD-RoF のスケーラビリティに関する評価と elastic RoF module の実装評価および elastic RoF module を用いた無線通信性能を示す。最後に 5 節においてまとめを述べる。

2. 関連研究

SD-RoF は Software Defined Networks (SDN) から着想を得た。SDN はネットワークをコントロールプレーンとデータプレーンに分離する。コントローラから各ネットワーク機器を制御することで柔軟なネットワークの構築・運用を実現する [6]。例えば、5G アプリケーションのネットワークスライシング技術 [7] や仮想プライベートネットワーク [8]、従来の IP ネットワークとのハイブリット環境 [9] などへの適用が議論されている。SD-RoF との違いとして、SDN は主に有線系のネットワークをターゲットとして、L2 以上のレイヤでネットワークの構築・切り換えを行うのに対して、SD-RoF では無線アクセスネットワークを対象に L1 でネットワークの構築・切替を行う点が異なる。

SDN 的なアプローチを無線アクセスネットワークに導入したものとして Cloud RAN が挙げられる。Cloud RAN の元になった Wireless Network Cloud においては、従来の無線アクセスネットワークにおける基地局を Base Station (BS) 機能と Remote Radio Head (RRH) に分離したもの全般を Cloud RAN と呼んでいる。Cloud RAN では、5G のアプリケーション要求を満たすことを目的として、FlexRAN [10]、SoftAir [11]、H-RAN [12]、F-RAN [13] など Cloud RAN を発展させた様々なアーキテクチャが提案されている。SD-RoF は Wireless Network Cloud の観点では Cloud RAN に分類される。SD-RoF と近年の Cloud RAN との違いとしては、アナログ RoF を用いている点と、RoF 自体を柔軟に切り替える機構を持っていることが異なる。特に、無線双方向パススルーを実現できるアーキテクチャを示したのは、SD-RoF が世界で初である。

光ネットワークに柔軟性を与える技術として、Elastic

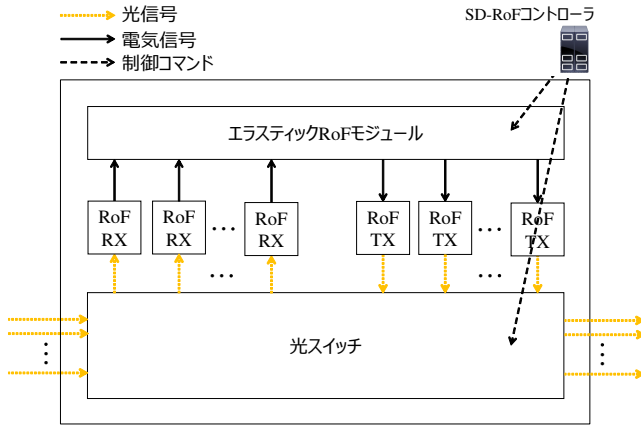


図 2: SD-RoF スイッチ

Optical Networks が挙げられる [14]。Elastic optical networks とは、ユーザの要求に対して光パスの周波数資源を細粒度かつ柔軟に割り当てることができる仕組みである。Elastic Optical Networks では SDM [15], FlexE [16], 仮想ネットワーク [17] を組み合わせたものや、データセンタを対象とした方式 [18] などが検討されている。Elastic Optical Networks が主にコアネットワークを対象としてコヒーレント光受信や光 OFDM などの最先端の光通信技術を想定しているのに対して、SD-RoF は無線アクセスネットワークを対象としてレガシーな光通信技術を利用している点が異なる。

3. Software Defined Radio over Fiber (SD-RoF) ネットワーク

SD-RoF に参加するユーザは SD-RoF コントローラに対して所望のワイヤレスサービスを要求する。要求は SD-RoF ネットワークに制御チャネルを設けて通信する方法と、携帯電話などの別のネットワーク網を使って通信するなどの方法を想定している。ユーザからサービス要求を受け取った SD-RoF コントローラは要求に応じて無線送受信機、SD-RoF スイッチ、SD-RoF エッジに制御コマンドを送ってワイヤレスサービスに必要な elastic wireless service 機能あるいは無線双方向パススルー機能をユーザに提供する。

3.1 SD-RoF スイッチ

図 2 に SD-RoF スイッチの構成を示す。SD-RoF スイッチは、光スイッチ回路、elastic RoF module、RoF 送受信機で構成される。光スイッチ回路は SD-RoF コントローラからの制御コマンドによって光信号の入出力ポートを切り替える。SD-RoF で用いる光スイッチは入力ポートと出力ポートの 1 対 1 接続を回路的に切り換える単純なものを想定している。光スイッチはパケットを処理しないため、入力信号の形式、データレートに関わらず同じ構成で収容で

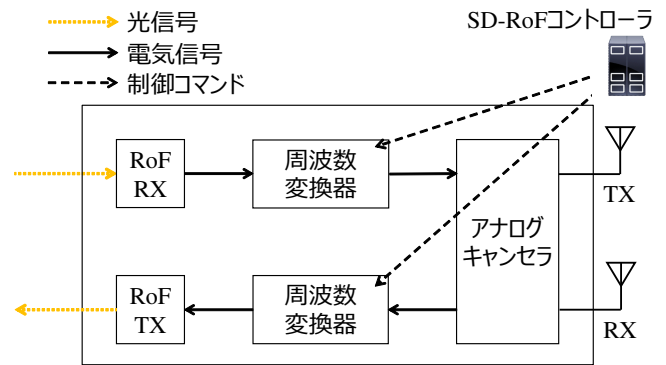


図 3: SD-RoF エッジ

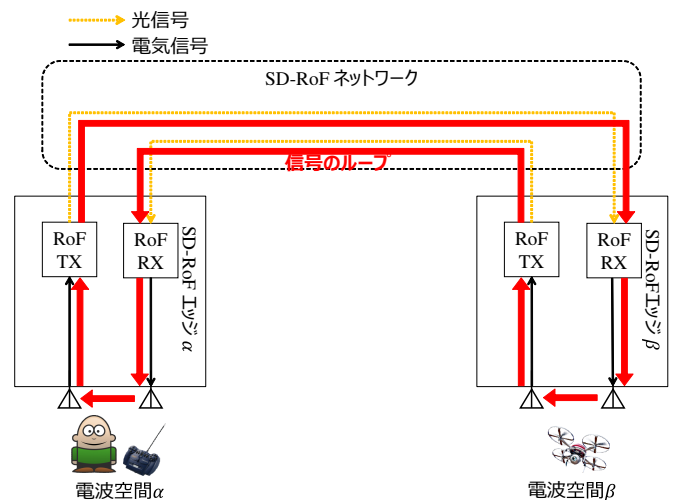


図 4: 無線双方向接続時の無線信号のループ

きる。Elastic RoF module は光信号から電気信号に変換した無線信号を SD-RoF コントローラからの制御コマンドによって周波数変換したり、合波する機能を具備したモジュールである。より具体的には、入力された複数の無線信号を周波数変換して合波するとともに、RoF 送信機で電気信号から光信号に変換することで、光周波数資源の効率的な利用を実現する。

3.2 SD-RoF エッジ

図 3 に SD-RoF エッジの構成を示す。SD-RoF エッジは RoF 送受信機、elastic RoF module、アナログキャンセラ、送受信アンテナから構成される。SD-RoF エッジにおける elastic RoF module は SD-RoF スイッチのものと同一の機能を持つ。本モジュールは Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) のように SD-RoF エッジ上で複数の同周波数帯無線信号を合波する必要があるとき、あるいは、SD-RoF エッジで受信した無線信号がいずれの SD-RoF エッジから送信されたか識別する必要があるときに利用する。アナログキャンセラ [5] は無線双方向パススルー機能を実現するために利用する。SD-RoF ネットワークにおいて複数の SD-RoF エッジを単純に相互接続した場合、無線

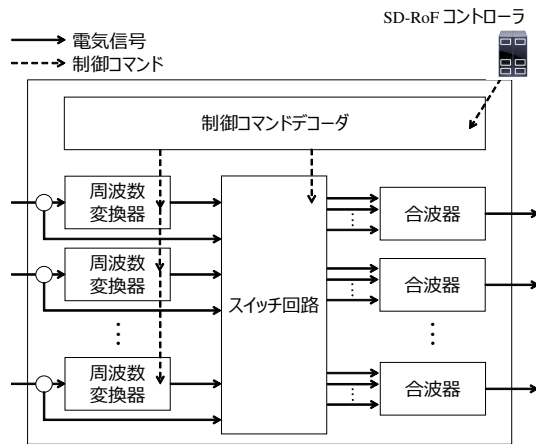


図 5: Elastic RoF module

信号のループに起因して通信が不可能となる。

図 4 に、アナログキャンセラを利用せず、ある電波空間 α 内のデバイスから異なる電波空間 β 内のデバイスに対してデータを送信したときの例を示す。電波空間 α 内のデバイスが送信した無線信号は SD-RoF エッジ α の受信アンテナで受信され、SD-RoF ネットワークを介して SD-RoF エッジ β の送信アンテナから電波空間 β 内のデバイスに対して送信される。このとき、SD-RoF エッジ β の受信アンテナは SD-RoF エッジ β の送信信号を自己干渉信号として受信する。受信した自己干渉信号は SD-RoF エッジ α の送信アンテナ → SD-RoF エッジ α の受信アンテナ → SD-RoF エッジ β の送信アンテナ → SD-RoF エッジ β の受信アンテナ → ... と信号の無限ループを招く。

アナログキャンセラは、自己干渉信号の伝搬路の特性に応じたキャンセル信号を生成・重畳して自己干渉を抑制する。より具体的には、各 SD-RoF エッジの送信信号のコピーから、自己干渉信号と逆位相・同振幅の信号を生成して重畳することで自己干渉信号を打ち消す。

3.3 Elastic RoF module

Elastic RoF module は SD-RoF エッジ・SD-RoF スイッチにおいて入力信号の周波数変換および合波を実現する。図 5 に、elastic RoF module のブロック図を示す。Elastic RoF module は周波数変換器、スイッチ回路、合波器、制御コマンドデコーダで構成される。Elastic RoF module に入力された各電気信号は周波数変換器とスイッチ回路へと分配される。周波数変換器は入力信号の搬送波周波数 f_1 を搬送波周波数 f_2 に変換する機能を具備する。より具体的には、入力信号を搬送波周波数 f_1 で直交変調するとともに所望信号の帯域幅のベースバンド信号を Low Path Filter (LPF) で抽出する。その後、抽出したベースバンド信号は搬送波周波数 f_2 に直交変調することで入力信号の周波数変換を実現する。図 6 に周波数変換器の構成を示す。周波数・ゲイン制御回路は Variable Gain Amplifier (VGA) が出力

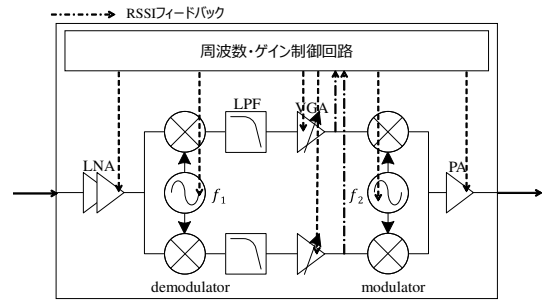
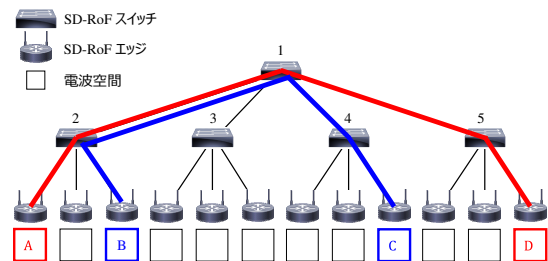
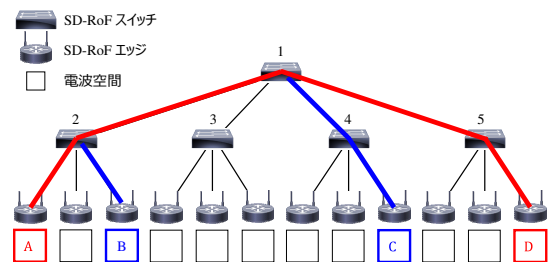


図 6: 周波数変換器



(a) Elastic RoF module を利用しない場合



(b) Elastic RoF module を利用する場合

図 7: 電波空間 A, B, C, D の相互接続時における elastic RoF module の効果

した信号の Received Signal Strength Indicator (RSSI) を元にして Low Noise Amplifier (LNA) と VGA のゲインを調整することで周波数変換器が出力する信号の強度を制御できる。また、変換元・変換先となる搬送波周波数 f_1 , f_2 はそれぞれ SD-RoF コントローラから制御コマンドデコーダ、周波数・ゲイン制御回路を介して変更できる。

合波器はスイッチ回路を介して入力された複数の電気信号を重畳して 1 つの電気信号を出力する。このとき、合波器で合波する電気信号の組み合わせはスイッチ回路の設定にしたがう。設定は SD-RoF コントローラから制御コマンドデコーダを介して、RF スイッチの電氣的な接続として反映される。

図 7 では、elastic RoF module が複数の電波空間を相互接続するときにもたらす影響を光ファイバ数の観点から示す。図 7 (a) に SD-RoF スイッチが elastic RoF module を具備しない場合における電波空間 A と D、電波空間 B と C を相互接続するときに必要な光ファイバを示す。ここで、電波空間 A, B, C, D では 2.412 GHz の無線 LAN で通信をしているとする。各 SD-RoF エッジで受信した無線信号

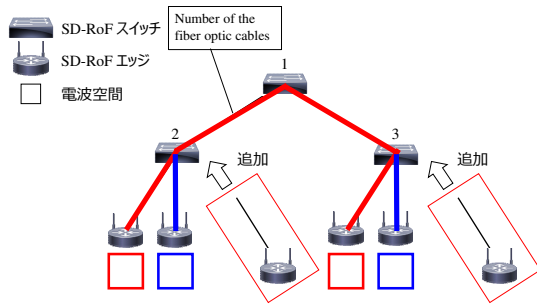


図 8: 評価に用いた SD-RoF ネットワークモデル

は RoF 送信機によって光信号に変換されて SD-RoF ネットワークに送信される。このとき、SD-RoF スイッチ 2 下にある 2 台の SD-RoF エッジから受信した光信号それぞれに対して光ファイバケーブルが必要となるため、SD-RoF スイッチ 1, 2 間では 2 本の光ファイバケーブルが必要となる。

図 7 (b) に、SD-RoF スイッチが elastic RoF module を具備する場合における電波空間 A と D、電波空間 B と C を相互接続するときに必要な光ファイバを示す。先ほどの例とは異なり、SD-RoF スイッチ 2 で 2 つの光信号を受信するとそれぞれの信号は elastic RoF module を介して 1 本の光信号として出力される。このとき、SD-RoF スイッチ 1, 2 間で必要となる光ファイバケーブルは 1 本となる。

4. 性能評価

4.1 スケーラビリティ

Elastic RoF module を導入する利点を定量的に示すために、光ファイバケーブル数に着目した評価を行った。図 8 に評価に用いる SD-RoF ネットワーク構成を示す。図 8 の SD-RoF スイッチ 2 と SD-RoF スイッチ 3 のそれぞれに、SD-RoF エッジを複数台接続していく場合に SD-RoF スイッチ 1 と SD-RoF スイッチ 2 の間の光ファイバケーブル数を解析した。SD-RoF スイッチに接続した SD-RoF エッジ 1 台は、もう一方の SD-RoF スイッチに接続された SD-RoF エッジ 1 台とのコネクションを持つことを想定した。また、各 SD-RoF エッジは、16 波長を使用できるとする。16 波長としたのは、NG-PON2 規格で利用できる波長数が上り・下りで各 8 波長となっているためである [19]。

SD-RoF ネットワークを接続するスイッチとして、1) elastic RoF module を具備しないスイッチ、2) elastic RoF module を具備しないが、光スイッチとして波長選択スイッチ (WSS) を用いるスイッチ、3) elastic RoF module を具備した SD-RoF スイッチの 3 つの場合を挙げて比較した。WSS は、入力された波長分割多重信号を波長ごとに分離して、分離された各信号を伝送するための出力ポートを任意に決定できる光スイッチである。

図 9 にコネクション数に対する光ファイバケーブル数の推移を示す。評価結果から以下の 3 つのことがわかった。

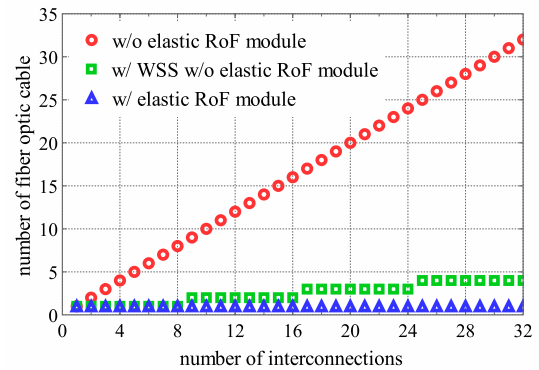


図 9: SD-RoF ネットワークの相互接続数に対する光ファイバケーブル数の推移

表 1: Elastic RoF module の構成部品

部品	単価 [円]	個数	価格 [円]
STM32F446RET6	889	5	4445
MAX2830ETM+T	974	8	7792
TLV3201AIDBVR	126	16	2016
LTC2630CSC6-HZ10	372	16	5952
ARS1412	713	48	34224
PD2328J5050S2HF	78	8	624
other parts	—	—	49672
Total			104725

- elastic RoF module を具備しないスイッチの場合には、光ファイバケーブル数は線形に増加すること。各スイッチに多重化機能がないため、各相互接続において 1 本の光ファイバケーブルが必要になる。
- elastic RoF module を具備しないが、WSS を用いたスイッチの場合、コネクション数が波長数 8 の倍数となるたびに必要となる光ファイバケーブル数が増加すること。1 相互接続につき 2 波長を使用するため、1 本の光ファイバケーブルで収容できる相互接続数は最大で 8 となる。
- elastic RoF module を具備したスイッチの場合、相互接続数が 32 以下の場合に必要な光ファイバケーブル数は一定となること

以上の結果より、elastic RoF module を追加することで、SD-RoF ネットワークの柔軟性と拡張性が向上することが分かる。

理想的な elastic RoF module で無線信号を周波数軸で多重化することを想定すると、電波空間が消費する無線帯域幅を数 10 MHz、コネクション数を 100 程度とした場合で数 GHz の帯域を消費することになる。一方、RoF が収容できる帯域幅は数 GHz 程度であるため、コネクション数が 100 以下の範囲においては光ファイバケーブルの追加なしで全てのコネクションを収容できると考えられる。

4.2 Elastic RoF module の実装評価

本稿では、4 台の着脱可能な周波数変換器と、1 個のス



図 10: 実装した elastic RoF module

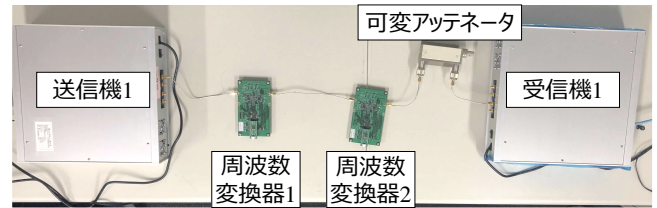
表 2: 周波数変換器への入力電力に対する LNA・VGA の最適値および測定 CNR

入力電力 [dBm]	LNA	VGA	CNR [dB]
-20	Low	0	22.03
-30	Low	0	23.57
-40	Low	10	21.16
-50	Mid	10	24.36
-60	Mid	10	21.81
-70	High	10	21.35
-80	High	10	17.32

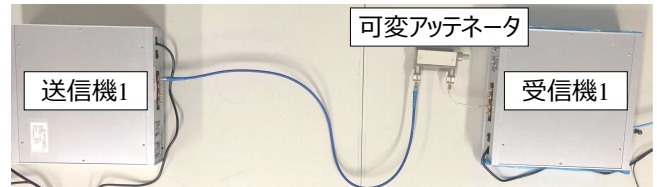
スイッチ回路と 4 個の合波器を具備した電気回路 1 台から構成される elastic RoF module を実装した。図 10 に実装した elastic RoF module, 表 1 に実装した elastic RoF module で用いた部品を示す。部品代の合計は、約 10 万円となった。図 5 の周波数変換器は、図 6 の周波数およびゲイン制御回路として STMicroelectronics 製 STM32F446 を 1 個、Texas Instruments 製 TLV3201 を 4 個、Linear Technology 製 LTC2630 を 4 個用いて構成した。また、図 6 の LNA, demodulator, LPF, VGA として Maxim Integrated 製 MAX2830ETM を 1 個、modulator, PA として Maxim Integrated 製 MAX2830ETM を 1 個用いた。図 5 の制御コマンドデコーダとして、STMicroelectronics 製 STM32F446 を 1 個用いた。図 5 のスイッチ回路は、Anaren 製 PD2328J5050S2HF を 4 個、Panasonic Electric Works 製 ARS1412 を 48 個用いて構成した。図 5 の合波器として、Anaren 製 PD2328J5050S2HF を各 1 個、合計 4 個用いた。以上の実装結果から、elastic optical networks や現在のコアネットワークで使用されているデバイスと比較して、安価なデバイスを用いて柔軟な SD-RoF ネットワークを構築できることを確認した。

4.3 Elastic RoF module による無線通信性能への影響

本節では、実装した elastic RoF module の無線通信性能



(a) 周波数変換器を導入した場合



(b) 直接接続した場合

図 11: 実験構成: 周波数変換器による無線通信性能への影響

を評価するために 2 通りの実機実験を行った。より具体的には、周波数変換器の導入による無線通信性能への影響、合波器の導入による無線通信性能への影響を評価した。ここで、無線通信性能とは送受信機間の Carrier to Noise Ratio (CNR) と定めた。

周波数変換器を導入することによる無線通信性能への影響を評価するために、周波数変換器を介した場合と送受信機間を同軸ケーブルで直接接続した場合の CNR を比較した。図 11 に実験の構成を示す。送信機および受信機は無線通信方式として IEEE 802.11g を利用するものとした。各機器間は同軸ケーブルで接続した。このとき、2 台目の周波数変換器と受信機間の空間減衰を再現するため、可変アッテネータを用いて信号を減衰させた。送信機は信号強度 -40 dBm, 周波数 2.412 GHz, データレート 12 Mbps で 100 パケットを送信するものとした。1 台目の周波数変換器は送信機の送信信号を周波数 2.412 GHz から 2.442 GHz に変換, 2 台目の周波数変換器は周波数 2.442 GHz の無線信号を 2.412 GHz に変換するものとした。受信機では受信した 100 パケットから平均 CNR を測定した。各周波数変換器を構成する VGA, LNA の設定値は表 2 にしたがって定めた。2 台の周波数変換器でのゲイン調整の結果として無線信号の強度は -30 dBm となるため、直接接続の場合には周波数 2.412 GHz の無線信号を信号強度 -30 dBm で送信した。

図 12 に、送受信機を直接接続した場合と周波数変換器を導入した場合の CNR を示す。横軸は可変アッテネータでの減衰量に相当する電波伝搬距離を示す。図 12 から、以下の 2 つのことが分かる。

- 直接接続の場合には無線伝搬距離が遠くなるにつれて、CNR が最大 35 dB から徐々に低下すること
- 周波数変換器を導入した場合、無線伝搬距離が 3 m 以

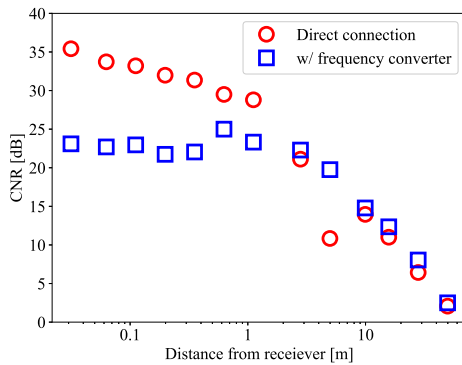


図 12: 周波数変換器の導入による CNR の劣化量

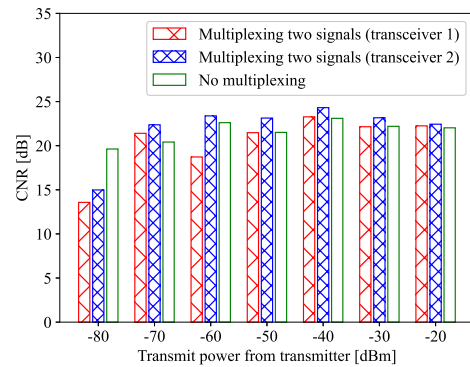


図 14: 合波による CNR への影響

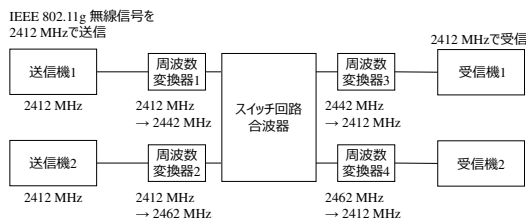


図 13: 実験構成: 合波器による無線通信性能への影響

上のときから CNR が 23 dB 程度から徐々に低下すること

- 無線伝搬距離が 3 m 以上になると直接接続の場合と周波数変換器を利用した場合とでほぼ同等の CNR となること

次に、合波器による無線通信性能への影響を評価するために、合波を利用しない場合と 2 地点からの無線信号を合波した場合との CNR を比較した。図 13 に実験の構成を示す。送信機および受信機は実験 1 と同様に無線通信方式として IEEE 802.11g を利用するものとした。各送信機、各周波数変換器、スイッチ回路・合波器、各受信機は同軸ケーブルで接続した。送信機では周波数 2.412 GHz、データレート 12 Mbps で 100 パケットを送信した。送信機 1 から送信された無線信号は周波数変換器 1 で周波数 2.442 GHz に、送信機 2 から送信された無線信号は周波数変換器 2 で周波数 2.462 GHz に変換した。周波数変換された各無線信号はスイッチ回路・合波器で合波されて、周波数変換器 3、4 へと入力された。周波数変換器 3 は周波数 2.442 GHz の無線信号を抽出して周波数 2.412 GHz に変換して、周波数変換器 4 は周波数 2.462 GHz の無線信号を抽出して周波数 2.412 GHz に変換した。合波を利用しない場合には、送信機 1 が送信した周波数 2.412 GHz の信号を周波数変換器 1 で周波数 2.442 GHz に変換するものとした。その後、スイッチ回路・合波器を素通りさせて、周波数変換器 3 で再び周波数 2.412 GHz に変換した。受信機では受信パケットから平均 CNR を測定した。

図 14 に、合波を利用しない場合と 2 地点からの無線信

号を合波した場合との CNR を示す。横軸は始めの周波数変換器 1 あるいは周波数変換器 2 に入力される無線信号強度を示す。図 14 より、信号強度が -20 dBm から -70 dBm の場合には、CNR の差はほとんど見られないことが分かった。以上の結果より、2 地点から送信された無線信号を合波する場合に互いの地点から伝送された無線信号の CNR を低下させることなく合波を実施できることが分かった。一方で、信号強度が -80 dBm の場合には、2 地点の信号を合波する場合において CNR に 5 dB 程度の低下が見られた。本実験では CNR の低下が生じた要因を特定できなかったため、今後の実機検証を通じて原因を特定する必要がある。

4.4 スイッチ回路・合波器の基礎特性評価

スイッチ回路と合波器においては、性能評価として電力損失、平均アイソレーション、スイッチ回路の再設定時間を測定・計算した。平均アイソレーションは、ある入力ポートに投入した信号が出力すべきポート以外に入出力ポートに漏れ出す電力を表している。実験結果から、電力損失は 10.4 dB、平均アイソレーションは 48.6 dB であることが分かった。ただし、電力損失には分配器で生じる分配損失が含まれる。また、スイッチ回路の再設定時間は、実装に用いた Panasonic Electric Works 製 ARS1412 のスイッチ速度 [20] を考慮して、10 ms 以内であると推定される。

4.5 周波数変換器の設定値による影響

本稿で実装した周波数変換器は、Low, Mid, High の 3 段階に調整できる LNA と、32 段階調整可能な VGA にしたがって周波数変換した信号を出力する。このとき、周波数変換器から出力される信号品質は、周波数変換器に入力された信号の強度に応じた LNA および VGA の設定に依存することが分かっている。本稿では、LNA および VGA に対する最適設定を自動化するための足掛かりとして、LNA および VGA に対して異なる設定を適用した場合の出力信号への影響を評価した。評価指標として、出力信号

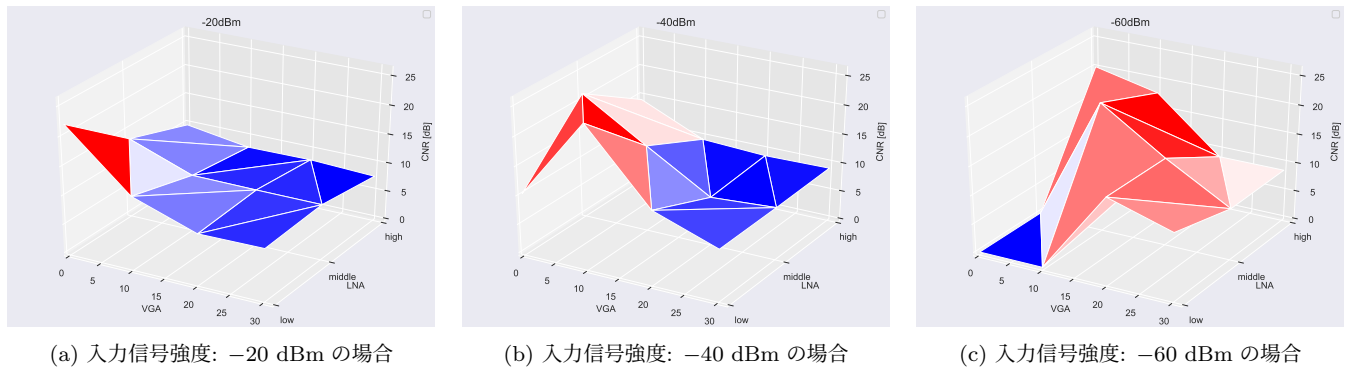


図 15: LNA および VGA の設定値に対する CNR

を受信機で受信したときの CNR を用いた。本実験では送信機 1 台、周波数変換器 1 台、受信機 1 台を利用する。送信機は周波数 2.412 GHz、データレート 12 Mbps で 100 パケットを送信するものとした。周波数変換器は入力された無線信号を周波数 2.442 GHz に変換して受信機に入力するとともに、受信機は入力信号を元にして CNR を取得した。このとき、周波数変換器に対する入力信号強度は、送信機に具備されたアッテネータを用いて -20 dBm から -80 dBm まで 10 dB 刻みで変化させた。また、本評価では、VGA に設定可能な 32 段階の値のうち、0, 10, 20, 30 の 4 段階を利用した。

図 15 に、周波数変換器に対する入力信号強度が -20 dBm, -40 dBm, -60 dBm であるときの CNR を示す。また、表 2 には各入力信号強度に対する LNA および VGA の最適値、最適値を設定したときの CNR および EVM を示す。なお、受信機でパケットを受信できなかった場合は、CNR を 0 dB と定めた。評価結果より、入力信号強度に対して LNA と VGA の設定値によって、出力信号の CNR が大きく変化することが分かった。以上の結果から、周波数変換器への入力信号強度に応じた適切なゲイン制御が信号品質の劣化を防ぐために非常に重要であることが確認できた。

5. アプリケーションシナリオ

5.1 Software Defined WiFi

Software Defined WiFi (SD-WiFi) とは、ユーザが所望する場所において所望の機能を有した WiFi を利用できるアプリケーションである。SD-RoF の機能である elastic wireless service を利用して構築する。SD-WiFi によって、WiFi AP を物理的に置き換えずに新しい規格に遠隔でアップデートすることや、外出先で自宅の WiFi AP を利用することが実現される。WiFi の規格は、主に 2.4 GHz 帯、5 GHz 帯において、IEEE 802.11b, IEEE 802.11a, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac が展開されており、同じ規格を用いた WiFi AP でも対応する通信速

度が異なる場合がある。SD-WiFi を利用することで、例えばブラウザから設定するだけで SD-RoF 上の無線送受信機に要求が反映されて、WiFi AP への機能のアップデートを簡単に行うことができる。

5.2 遠隔操縦

遠隔操縦とは、自動車、重機、ロボットなどをネットワークを介して操作・操縦することを指す。遠隔操縦によって、危険を伴う建築物の解体作業の無人化や、ロボットを用いた遠隔手術などが実現できる。遠隔操縦では、操縦者は遠隔の機械に取り付けられたカメラからの映像を見ながら操縦を行う。遠隔操縦を実現するためには、映像伝送のための低遅延かつ高信頼な通信が必要となる。現在の無線アクセスネットワークでは、映像のコーデックによる遅延と通信遅延によって直接操作と同水準で遠隔操縦を行うことが難しい。SD-RoF を用いることで、非圧縮映像をカメラからディスプレイにあたかも直接送信しているかのように映像情報を伝送できるため、映像のコーデックによる遅延と通信遅延を削減することができる。また、遠隔操縦のさらなる高精度化にむけて、実際の操縦で生じる機械の傾きや揺れ、振動、加速度などを再現するための追加情報を伝送することも可能である。

5.3 Esports

SD-RoF は、Esports における遠隔での Peer-to-Peer のオンライン対戦ゲームに利用することも想定している。近年の Esports の隆盛は、対戦ゲームのオンライン化に起因していると考えられる。ボードゲーム、対戦アクションゲーム、対戦格闘ゲーム、ロールプレイング、リアルタイムストラテジー、First Person Shooting (FPS)、Third Person Shooting (TPS) など様々なコンテンツがオンラインゲーム化されている。しかしながら、低遅延性が求められるゲームでは、通信遅延による映像や操作のラグが勝敗に影響を及ぼすことが問題になっている。特に競技性が強く、ラグの影響が大きい対戦格闘ゲームや FPS、TPS で

は、未だに1つの会場にコンピュータや家庭用ゲーム機を持ち込んで実施されることが多い。しかしながら、競技が1つの会場で実施される場合には、プレイヤー自身の移動や会場内のLAN構築などが負担になる。SD-RoFを用いることで、複数地点のプレイヤー同士があたかも1つの会場で対戦しているかのように競技を行うことができる。

6. おわりに

本稿では、SD-RoFの実現に向けた重要な1構成要素であるSD-RoFネットワークを提案した。また、高い柔軟性を持つSD-RoFネットワークを構築するために、その構成要素であるSD-RoFスイッチおよびSD-RoFエッジに具備するelastic RoF moduleを実装した。スケーラビリティ評価の結果、elastic RoF moduleの導入によって、光ファイバケーブルを追加で敷設することなく、より多くの相互接続数に対応できることを示した。また、実装したelastic RoF moduleを用いた実験評価から、高い柔軟性を持つSD-RoFネットワークを安価に構築できること、電波伝搬距離が3 m程度のときはelastic RoF moduleによるCNRへの影響は小さいことがそれぞれ分かった。一方で、周波数変換器を構成するLNAおよびVGAを適切に制御しなかった場合、無線通信性能に対して著しい影響を及ぼす結果が見られた。

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] Bhattacharya, S. and Rawat, D.: Comparative Study of Remote Surgery Techniques, *IEEE Global Humanitarian Technology Conference*, pp. 407–413 (2015).
- [2] Alwateer, M., wai Loke, S. and Fernando, N.: Enabling Drone Services: Drone Crowdsourcing and Drone Scripting, *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 110035–110049 (2019).
- [3] Haddadin, S., Johannsmeier, L. and Ledezma, F. D.: Tactile Robots as a Central Embodiment of the Tactile Internet, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 107, pp. 471–487 (2019).
- [4] Simsek, M., Aijaz, A., Dohler, M., Sachs, J. and Fettweis, G.: 5G-Enabled Tactile Internet, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 34, No. 3, pp. 460–473 (2016).
- [5] 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), 福島県磐梯熱海温泉華の湯 (福島県郡山市), pp. 1–10 (2019).
- [6] Cox, J. H., Chung, J., Donovan, S., Ivey, J., Clark, R. J., Riley, G. and Owen, H. L.: Advancing Software-Defined Networks: A Survey, *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 25487–25526 (2017).
- [7] Ordonez-Lucena, J., Ameigeiras, P., Lopez, D., Ramos-

- Munoz, J. J., Lorca, J. and Folgueira, J.: Network Slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, Architectures and Challenges, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 55, pp. 80–87 (2017).
- [8] Noghani, K. A., Benet, C. H., Kassler, A., Marotta, A., Jestin, P. and Srivastava, V. V.: Automating Ethernet VPN Deployment in SDN-based Data Centers, *International Conference on Software Defined Systems (SDS'17)* (2017).
- [9] Hong, D. K., Ma, Y., Banerjee, S. and Mao, Z. M.: Incremental Deployment of SDN in Hybrid Enterprise and ISP Networks, *Proceedings of the Symposium on SDN Research*, Association for Computing Machinery, pp. 1–7 (2016).
- [10] Foukas, X., Nikaein, N., Kassem, M., Marina, M. K. and Kontovasilis, K.: FlexRAN: A Flexible and Programmable Platform for Software-Defined Radio Access Networks, *Proceedings of the 12th International on Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies (CoNEXT'16)*, pp. 427–441 (2016).
- [11] Akyildiz, I. F., Wang, P. and Lin, S.-C.: SoftAir: A software defined networking architecture for 5G wireless systems, *Computer Networks*, Vol. 85 (2015).
- [12] Peng, M., Li, Y., Jiang, J., Li, J. and Wang, C.: Heterogeneous Cloud Radio Access Networks: A New Perspective for Enhancing Spectral and Energy Efficiencies, *IEEE Wireless Communications*, Vol. 21, No. 6, pp. 126–135 (2014).
- [13] Peng, M., Yan, S., Zhang, K. and Wang, C.: Fog-Computing-Based Radio Access Networks: issues and challenges, *IEEE Network*, Vol. 30, No. 4, pp. 46–53 (2016).
- [14] Jinno, M., Takara, H., Kozicki, B., Tsukishima, Y., Sone, Y. and Matsuoka, S.: Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 47, No. 11, pp. 66–73 (2009).
- [15] Oliveira, H. M. N. S. and da Fonseca, N. L. S.: P-cycle Protected Multipath Routing, Spectrum and Core Allocation in SDM Elastic Optical Networks, *IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC'19)*, pp. 1–6 (2019).
- [16] Lu, W., Kong, J., Liang, L., Liu, S. and Zhu, Z.: How Much Can Flexible Ethernet and Elastic Optical Networking Benefit Mutually?, *IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC'19)*, pp. 1–6 (2019).
- [17] Zhao, J. and Subramaniam, S.: Virtual Network Mapping in Elastic Optical Networks with Advance Reservation, *IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC'20)*, pp. 1–7 (2020).
- [18] Liu, Y., Gu, H., Yan, F., Yu, X. and Wang, K.: Multi-Controller Placement Based on Two-Sided Matching in Inter-Datcenter Elastic Optical Networks, *IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC'20)*, pp. 1–6 (2020).
- [19] International Telecommunication Union: 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements, https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.989.1-201303-I!!PDF-E&type=items (2013).
- [20] Panasonic Electric Works: ARS Series Datasheet, https://www3.panasonic.biz/ac/e_download/control/relay/device-hi/catalog/mech.eng.rs.pdf (2019).