

# 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

石岡 卓将<sup>1</sup> 福井 達也<sup>2</sup> 成川 聖<sup>2</sup> 桐原 誉人<sup>2</sup> 南 勝也<sup>2</sup> 池田 智<sup>2</sup> 椎名 亮太<sup>2</sup> 木下 和彦<sup>3</sup>  
木崎 一廣<sup>1</sup> 猿渡 俊介<sup>1</sup> 渡辺 尚<sup>1</sup>

**概要:** 今後登場しうるドローンや自動車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, 音楽セッション, 下水管検査用ロボットなどのサービスを想定すると, 広帯域性と低遅延性を兼ね備えたネットワーク技術が求められている. これに向けて, 筆者らは, 光と無線を密結合したアーキテクチャ「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アクセスネットワークの検討を進めている. 本稿では, SD-RoF の一機能である振幅遅延制御回路を用いた光ファイバ無線双方向同時パススルー技術について詳細に述べる. 本光ファイバ無線双方向同時パススルー技術は, 空間的に離れた2地点に存在する端末同士を SD-RoF を介して電波で直接通信可能とする技術である. 提案手法を実際に実装して検証した結果として, 低遅延の IoT 端末同士の通信エリア拡張が本システムにより実現可能であることを示す.

## 1. はじめに

2019年5月時点のネットワーク技術において, 低遅延性と広帯域性を両立することが大きな課題となっている. Amazon, Netflix によるオンライン映像配信の隆盛, YouTuber や VTuber の登場, ネットワークゲーム, ゲームの実況コンテンツなど, ネットワークにおける通信帯域の消費は増加する一方である. また, 今後登場しうるドローンや自動車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, 音楽セッション, 下水管検査用ロボットなどのサービスを想定すると, 通信帯域だけでなくネットワーク遅延も極限まで小さくすることが求められる.

大容量性と低遅延性を兼ね備えたネットワークを実現するためには, ネットワークの設計を抜本的にやりなおす必要がある. 現状ではデバイスまでのラストワンホップは無線 LAN や Bluetooth などの無線が使われることが一般的になっている. 無線は有線と比較すると通信容量が少ないため, 通信容量の観点では無線通信がボトルネックになる. また, 無線と有線の境界領域におけるバッファリングやエンコード・デコードが通信遅延を引き起こす.

大容量性と低遅延性を兼ね備えたワイヤレスアクセス

ネットワークを実現することを目的として, 筆者らは光と無線を密結合したアーキテクチャ「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アクセスネットワークの提案を行っている. 図1に SD-RoF の概念図を示す. SD-RoF とは, 既存の RoF において固定的であったアンテナと無線送受信器との関係をソフトウェア的に自由自在に制御可能としたものである. 具体的には,

- (1) 振幅遅延制御回路を用いた光ファイバ無線双方向同時パススルー技術
- (2) 光スイッチと電気スイッチ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つから構成される.

本稿では, SD-RoF における「(1) 振幅遅延制御回路を用いた光ファイバ無線双方向同時パススルー技術」について詳細に述べる. 振幅遅延制御回路を用いた光ファイバ無線双方向同時パススルー技術は, 空間的に離れた2地点に存在する端末同士を SD-RoF を介して電波で直接通信可

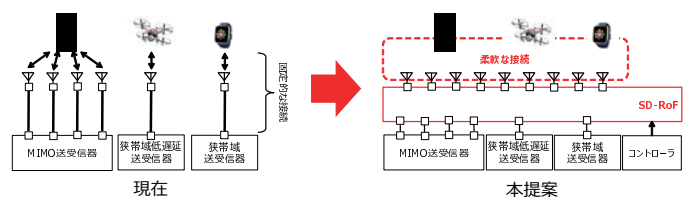


図1: SD-RoF

<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

<sup>3</sup> 徳島大学大学院社会産業理工学研究部

能とする技術である．単純に RoF を用いて空間的に離れた 2 地点に存在するアンテナ同士を接続するだけでは信号がループして通信ができなくなる．そこで提案システムでは，各拠点の送信アンテナと受信アンテナの間に振幅・遅延制御回路を挿入・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アンテナで受信した自己干渉信号に重畳することでループを解消する．提案手法を実際に実装して検証した結果，低遅延の IoT 端末同士の通信エリア拡張が本システムにより実現可能であることが確認された．

本稿の以降の構成は以下のとおりである．2 節では長距離間で低遅延性が求められるアプリケーションやその要件，関連研究について述べる．3 節で提案手法とその技術背景について述べ，4 節では提案システムについて理論的な評価を行う．5 節で実機を用いた検証による評価を行い，最後に 6 節において結論と今後の課題を述べる．

## 2. 無線通信エリア拡張技術

### 2.1 要件

SD-RoF によって実現される機能の 1 つとして，無線通信エリアの拡張が挙げられる．無線通信エリアの拡張とは，既存の無線通信規格で規定されている距離を超えてより遠くの端末と通信を行うことを意味する．例えば，一般的には 2.4 GHz 帯の IEEE 802.11 は長くても数百メートルしか届かない．SD-RoF では，電波が届く範囲外の端末とも通信できる機能を提供する．

電波が届く範囲外の端末と通信するネットワークアプリケーションの例として，2.4 GHz 帯の IEEE 802.15.4[1] を制御チャンネル，2.4 GHz 帯の IEEE 802.11 を映像通信用のチャンネルとして具備したドローンを用いて市街地で数 10 キロ平方メートルをモニタリングを行う場合を考える．ユーザはドローンから IEEE 802.11 を介して送られてくる映像を見ながらコントローラからの制御信号を IEEE 802.15.4 で送信してドローンを制御する．IEEE 802.15.4 も IEEE 802.11 も基本的には数百メートルしか届かないため，通常の IEEE 802.11 や IEEE 802.15.4 を使っていた場合には通信範囲外に出たドローンの制御ができなくなる．他にも，医師が遠隔地からカメラ越しに遠隔手術を行うことや [2]，低遅延性が必要な e-sports，自動車の遠隔運転などのアプリケーションを想定している．

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 つの要件を満たした無線通信エリア拡張技術が求められる．1 つ目は，既存の多様な無線通信規格を変更なしに利用できることである．展開の容易性を考えると無線通信規格の変更なしにエリアを拡張できることが望ましい．既に 2.4 GHz 帯の無線通信規格だけでも Wi-Fi，Bluetooth，ZigBee などを用いた無線通信端末が存在するが，これらを透過的に扱うことができることが理想的である．

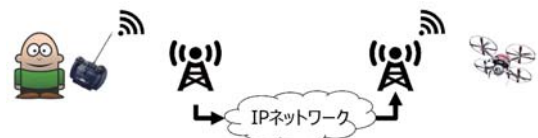


図 2: IP ネットワークを介した場合の例



図 3: アドホックネットワークを介した場合の例

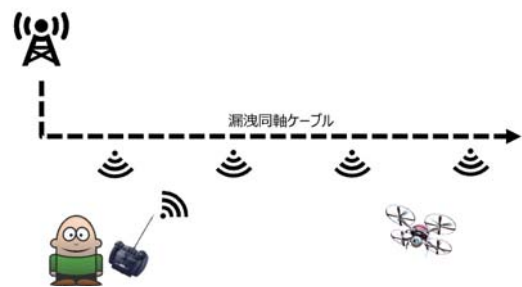


図 4: 漏洩同軸ケーブルを用いた場合の例

2 つ目は，広帯域通信の実現である．上記の例では，IEEE 802.15.4 と IEEE 802.11 の 2 種類の規格で通信している．IEEE 802.11g の一番周波数が低いチャンネルは中心周波数が 2.412 GHz で帯域幅が 20 MHz，一番周波数が高いチャンネルは中心周波数が 2.472GHz で帯域幅が 20 MHz である．IEEE 802.15.4g の一番周波数が低いチャンネルは中心周波数が 2.405 GHz で帯域幅が 2 MHz，一番周波数が高いチャンネルは中心周波数が 2.48GHz で帯域幅が 2 MHz である．すなわち，2.4 GHz 帯において IEEE 802.11g と IEEE 802.15.4 の両方を同時に成り立たせるためには最大で 2.402 GHz~2.482GHz の 80MHz の帯域をカバーする必要がある．

3 つ目は，低遅延通信の実現である．上記のアプリケーションも含めて，今後期待されている自動車の自動運転やロボットの遠隔操作の実現 [3] には，低遅延で情報交換可能な仕組みが不可欠である．ロボットの制御を考えると，片方向遅延は 1 ms 以下に収まることが望ましい [4]．

4 つ目は，高い周波数利用効率である．無線通信において，電波を強く放出すれば通信エリアは簡単に拡張できる．しかしながら，電波を強く放出すればするほど他のシステムへの干渉となり，全体的な周波数利用効率は低下する．無線通信で使いやすい UHF 帯の周波数はひっ迫されており，周波数利用効率の高い手法が望ましい．

### 2.2 関連研究

本節では，無線通信エリアの拡張の観点から既存技術と

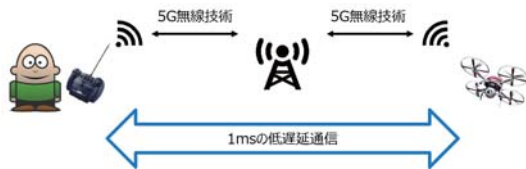


図 5: 低遅延通信技術を用いた場合の例

前述した 4 つの要件

- 既存の多様な無線通信規格を変更なしに適用可能
- 広帯域通信
- 低遅延通信
- 高い周波数利用効率

の関係を議論する。

IoT 向けの長距離無線通信技術として、LPWA (Low Power, Wide Area)[5] として注目されている LoRaWAN や Sigfox が挙げられる [6]. LoRaWAN や Sigfox では、少ない消費電力で半径数 km–数 10 km の通信が可能である。しかしながら、LoRaWAN や Sigfox で数 10 km の距離で通信を行うと、通信速度が 100 bps となる。通信速度が 100 bps の場合、30 バイトのパケットを送るだけで 2.4 s の時間が必要となることから低遅延通信には向いていない。また、数 10 km 伝搬する強さの電波を飛ばすと干渉範囲も大きくなるため、周波数利用効率も悪くなる。

IP ネットワークを介して IoT 端末から放出されたパケットを中継する方法も考えられる [7]。図 2 に IP ネットワークを介した場合の例を示す。例えば、IEEE 802.15.4 で通信している場合、一度 IEEE 802.15.4 パケットを PC で受け取ってから IP パケットとして遠隔の PC まで送信したのち、遠隔の PC から IEEE 802.15.4 パケットを送信する方法が考えられる。しかしながら、IEEE 802.15.4 と IP ネットワークの境界においてエンコード・デコードが発生するため、1 ms 以下の遅延を実現するのは難しい。また、通信帯域も IP ネットワークの帯域に制限される。

アドホックネットワークを介して IoT 端末から放出されたパケットをパケットリレー式に転送する方法も考えられる。図 3 にアドホックネットワークを介した場合の例を示す。Store and Forward 方式 [8] を用いた場合には、ホップ毎にエンコード・デコードが発生するため、遅延が大きくなる。また、中継する度に電波を放出するため、電波の周波数利用効率も悪化する。全二重無線通信方式を用いたりリレー [9] や、Amplify and Forward の方式を用いることで Store and Forward 方式よりも遅延を抑えることができるものの、電波の周波数利用効率に関しては Store and Forward 方式と同様に悪化する。

漏洩同軸ケーブル (LCX: Leaky Coaxial cable) を利用する方法も考えられる。図 4 に同軸漏洩ケーブルを用いた場合の例を示す。LCX とは、同軸ケーブルの外部導体の周期的な電波漏れ機構 (スロット) から伝送波の一部を外部に

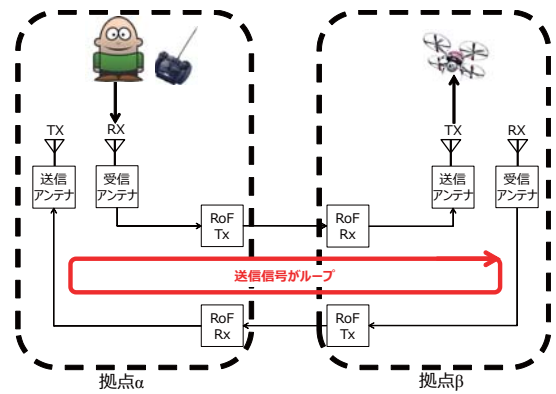


図 6: 自己干渉による信号ループの問題

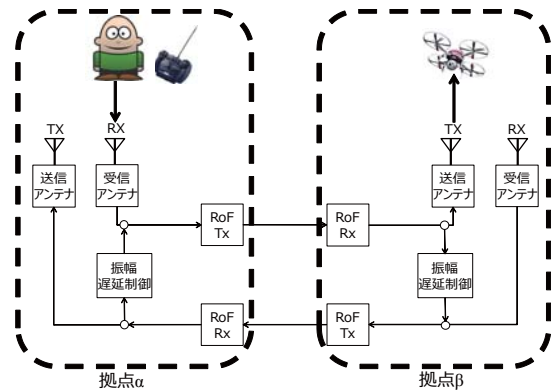


図 7: 提案システム

放射するように設計されたアンテナである。LCX を敷設することで線状の広い無線通信領域を確保することが可能である。AP で受けた信号を増幅して漏洩同軸ケーブルから送信することで、漏洩同軸ケーブル周囲にも電波を届けることができる。しかしながら、漏洩同軸ケーブルから放出される電波は同軸漏洩ケーブルの周囲数メートルであるため、通信距離が短い [10]。また、漏洩同軸ケーブル自体が抵抗を持っているため、距離を延ばすのが難しいという問題も有する。

低遅延な無線通信技術としては、現在規格化が進行中の第 5 世代移動通信システム (5G) が挙げられる [11]。図 5 に 5G を用いた場合の例を示す。5G の国際標準化における要求条件が挙げられており、10 Gbps 以上の通信速度、エンドツーエンドで 1 ms の低遅延、99.999 % の信頼性を目標値として、NOMA などの利用の検討が進められている [12]。5G を用いることで、将来的には低遅延な無線通信を実現できる可能性はある。しかしながら、既存の無線通信規格で既に展開されている IoT デバイスに対応することはできない。

### 3. 提案技術: 振幅遅延制御回路を用いた光ファイバ無線双方向同時パススルー

#### 3.1 全体像

2 節の議論を基に、振幅遅延制御回路を用いた光ファイ

無線双方向同時パススルー技術を設計した。アナログ RoF を用いることで、パケットのエンコード・デコードが不要となり、低遅延化を実現する。RoF を利用するための無線信号をベースバンド信号に変換することなく直接伝送することができるため、スイッチングなどのベースバンド信号処理による帯域の制約を受けない。

提案システムでは、2つの拠点間を上りと下りの2つの RoF で接続する。しかしながら、単純にアンテナ同士を接続するだけでは双方向通信ができないという「信号ループ問題」が発生する。図6に RoF を用いて無線通信エリアを拡張した場合に発生する信号ループ問題を示す。拠点  $\alpha$  の端末から送信した信号が拠点  $\alpha$  の受信アンテナで受信されて、RoF を介して拠点  $\beta$  の送信アンテナから送信される。逆に、拠点  $\beta$  の端末から送信した信号は拠点  $\beta$  の受信アンテナで受信されて、RoF を介して拠点  $\alpha$  の送信アンテナから送信される。拠点  $\alpha$  の端末から送信した信号が拠点  $\beta$  の送信アンテナで送信されると、拠点  $\beta$  の受信アンテナがその信号を自己干渉信号として受信する。さらにその信号が再度拠点  $\alpha$  の送信アンテナから送信されることになって、無限ループが生じて通信できなくなる。

このような信号ループ問題に対して、提案システムでは、振幅遅延制御回路と RoF を組み合わせることで長距離間の双方向通信を実現する。図7に提案システムの全体像を示す。図7では、拠点  $\alpha$  の端末から拠点  $\beta$  の端末に対して通信を行っている。拠点  $\alpha$  の端末から送信された電波は拠点  $\alpha$  の受信アンテナで受信され、RoF を介して拠点  $\beta$  の送信アンテナから送信される。このとき、拠点  $\beta$  では、拠点  $\alpha$  から受け取った信号を振幅遅延制御回路に入力する。拠点  $\beta$  の送信アンテナから送信された信号は拠点  $\beta$  の受信アンテナで受信されて自己干渉信号となる。本来であればこの受信アンテナで受信した信号がループする。提案システムでは、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となる信号を生成する。生成した逆位相の信号と受信アンテナで受信した信号とを重畳することでループした信号をキャンセルする。

### 3.2 RoF

RoF はある地点の RF 信号を光ファイバを用いて別の地点に伝送するための機構である。元来は、無線高周波信号を地下やトンネルなど電波の届かない不感地帯へ光ファイバを用いて伝送する技術であった [13], [14]。RoF では、光ファイバを用いることで低損失かつ広帯域に無線高周波信号を伝送することができる。柔軟性の高い無線アクセスネットワークが構築できるため、5G などでも積極的な利用が検討されている [15], [16]。

RoF の種類としては、アナログ RoF とデジタル RoF の2種類が存在する。提案システムでは、低価格で実現でき

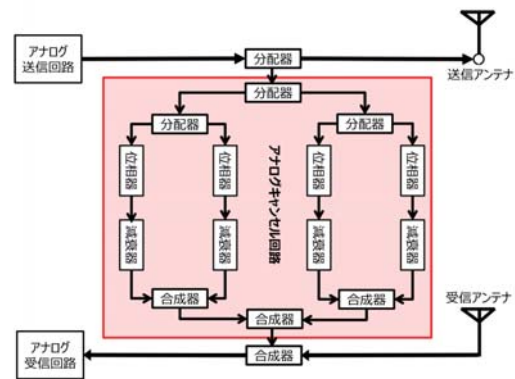


図 8: 振幅遅延制御回路の詳細

ることと遅延の小ささの2点の理由からアナログ RoF を用いる。RoF は2つの E/O 変換器を光ファイバで接続したもので構成される。アナログ RoF とデジタル RoF の違いは、RoF への入出力がアナログ信号か、デジタル信号かである。アナログ RoF では、アナログの電気信号を直接的に光信号に変換するため、デジタル RoF よりも低価格で実現できる。一方で、光送信機で生じる非線形歪みや雑音の影響を受けやすいという欠点がある。それに対してデジタル RoF では、デジタル信号を光の OOK (On-Off Keying) によって伝送するため、光送信機で生じる非線形歪みや雑音の影響は受けられないものの、光変調器復調器が必要になるので価格が高くなる。

### 3.3 振幅遅延制御回路

振幅遅延制御回路は、送信アンテナから送信された信号が受信アンテナに回り込んでくる自己干渉信号をキャンセルすることでループを解消する機構である。図8にループ問題の解消に用いる振幅遅延制御回路を示す [17]。まず、アナログ送信回路から出力された信号を分配器で送信アンテナと振幅遅延制御回路に入力する。振幅遅延制御回路に入力された信号は分配器によって、さらに複数の信号に分割される。信号を複数に分割するのはマルチパスを再現するためである。送信アンテナから受信アンテナに回り込んできたとき、直接波の他に壁からの反射波も自己干渉信号となる。信号を分割すればするほど、より細かいマルチパスを再現することができる。分割された信号は位相器によって位相を、減衰器によって振幅を制御されて合成器によって合成される。最後に、振幅遅延制御回路で生成した信号とアンテナから受信した信号とを合成器において重畳することで、自己干渉信号をキャンセルする。自己干渉信号のキャンセルによりループが解消される。

## 4. 性能解析

### 4.1 Signal-to-Noise Ratio (SNR)

拠点  $\alpha$  の端末から送信される信号の電力を  $P_{tx}$  [dBm],

無線通信における距離が  $d$  [m] の時の減衰を  $L_{\text{rf}}(d)$  [dB], RoF 送信モジュール (RoF TX) による信号増幅率を  $A_{\text{rof}}$  [dB], RoF における雑音指数を  $\text{NF}_{\text{rof}}$  [dB], 光通信における距離  $d$  [m] の時の減衰を  $L_{\text{opt}}(d)$  [dB], 拠点内の送信アンテナと受信アンテナ間の減衰  $L_{\text{ant}}$  [dB], 振幅遅延制御回路を挿入したことによる自己干渉除去のキャンセル量を  $C$  [dB], 拠点  $\beta$  の送信アンテナ地点において  $n$  回目のループで到達した信号を  $S_n$  [dBm], ノイズフロアを  $N$  [dBm] とする. 拠点  $\alpha$  の端末が送信した信号が最初に拠点  $\beta$  の送信アンテナ地点に到達したときの信号強度  $S_0$  は以下の式で表される.

$$S_0 = P_{\text{tx}} - L_{\text{rf}}(d_\alpha) + A_{\text{rof}} - L_{\text{opt}}(d_{\alpha,\beta}) \quad (1)$$

この最初に到達した信号が拠点  $\beta$  の送信アンテナから放出されて拠点  $\alpha$  をループして再度拠点  $\beta$  に戻ってきた際の信号は以下の式で表される.

$$S_1 = S_0 - 2\Lambda(d_{\alpha,\beta}) \quad (2)$$

ここで  $\Lambda(d)$  は距離  $d$  m 離れた 2 つの拠点において, 送信アンテナから送信された信号がもう一方の送信アンテナに到達するまでの減衰量を意味しており, 以下の式で表される.

$$\Lambda(d) = L_{\text{ant}} + C - A_{\text{rof}} + L_{\text{opt}}(d) \quad (3)$$

同様に, 再度ループして届く信号を一般化すると  $n$  回のループを経た信号  $S_n$  は以下の式で表される.

$$S_n = S_{n-1} - 2\Lambda(d_{\alpha,\beta}) \quad \text{if } n > 0 \quad (4)$$

また, 拠点  $\alpha$  の端末が送信した信号のノイズ成分が最初に拠点  $\beta$  の送信アンテナ地点に到達したときの信号強度  $N_{\beta,\text{ant}}$  は以下の式で表される.

$$N_{\beta,\text{ant}} = \max(N + A_{\text{rof}} + \text{NF}_{\text{rof}}, \sum_{i=1}^{\infty} S_i) \quad (5)$$

この時  $N + A_{\text{rof}} + \text{NF}_{\text{rof}}$  は, ループを考慮しないときの拠点  $\alpha$  の端末が送信した信号のノイズ成分が拠点  $\beta$  の端末の送信アンテナ地点に到達したときの信号強度である. また  $\sum_{i=1}^{\infty} S_i$  は, 拠点  $\alpha$  の端末が送信した信号のループによる干渉波が拠点  $\beta$  の端末の送信アンテナ地点に到達したときの信号強度である.  $\Lambda(d_{\alpha,\beta}) \leq 0$  の条件下では自己干渉波が増幅し続けて通信することは不可能である.  $\Lambda(d_{\alpha,\beta}) > 0$  と仮定すると以下の式が成り立つ.

$$S_{n+1} < S_n \quad \text{if } n \geq 0 \quad (6)$$

また,  $S_{n+1} \ll S_n$  と仮定すると  $N_{\beta,\text{ant}}$  は以下の式で表される.

$$N_{\beta,\text{ant}} = \max(N + A_{\text{rof}} + \text{NF}_{\text{rof}}, S_1) \quad (7)$$

式 (1) と式 (7) より, 拠点  $\beta$  の端末で受信する信号の信号雑音比  $\text{SNR}_\beta$  は以下の式で表される.

$$\text{SNR}_\beta = S_0 - L_{\text{rf}}(d_\beta) - \max(N, N_{\beta,\text{ant}} - L_{\text{rf}}(d_\beta)) \quad (8)$$

## 4.2 提案システムを用いた場合の遅延

無線端末が送信するパケットのサイズを  $D$  [Bytes], 無線端末の通信速度を  $B_{\text{ether}}$  [bps], 光ファイバ内の光の速度を  $c_{\text{rof}}$  [m/s] とする. 端末  $\alpha$  から電波として放出されるまでの伝送時間  $T_{\text{ether}}$  は以下の式で表される.

$$T_{\text{ether}} = \frac{8D}{B_{\text{ether}}} \quad (9)$$

また, 端末  $\alpha$  から端末  $\beta$  までの通信距離  $d_{\alpha,\beta}$  [m] をパケットが通過する時間  $T_{\text{trans}}$  は以下の式で表される.

$$T_{\text{trans}} = \frac{d}{c_{\text{rof}}} \quad (10)$$

端末  $\alpha$  から端末  $\beta$  まで到達するのにかかる時間  $T_{\text{delay}}$  は, 無線通信や電子回路の中を通過する時間を無視すると, 端末  $\alpha$  がパケットを送信する時間が  $T_{\text{ether}}$ , RoF を通過する時間が  $T_{\text{trans}}$ , 端末  $\beta$  がパケットを受信する時間が  $T_{\text{ether}}$  であるため, 以下の式で表される.

$$\begin{aligned} T_{\text{delay}} &= T_{\text{ether}} + T_{\text{trans}} + T_{\text{ether}} \\ &= \frac{d}{c_{\text{rof}}} + \frac{16D}{B_{\text{ether}}} \end{aligned} \quad (11)$$

したがって提案システム用いた場合のラウンドトリップタイム (RTT: Round-Trip-Time)  $T_{\text{rtt}}$  は以下ようになる.

$$T_{\text{rtt}} = \frac{2d}{c_{\text{rof}}} + \frac{32D}{B_{\text{ether}}} \quad (12)$$

## 4.3 IP ネットワークを用いた場合の遅延

無線端末が送信するパケットのサイズを  $D$  [Bytes], 無線端末の処理速度を  $B_{\text{radio}}$  [bps], 無線端末の通信速度を  $B_{\text{ether}}$  [bps] とする. IP ネットワークを中継した場合の遅延は, 伝搬時間  $T_{\text{trans}}$ , エンコード・デコード時間  $T_{\text{radio}}$ , 伝送時間  $T_{\text{ether}}$ , キューイング時間  $T_{\text{queue}}$  の合計となる. 伝搬遅延  $T_{\text{trans}}$  はどのような経路で通信が行われるかに依存するため定数とする. キューイング遅延  $T_{\text{queue}}$  は複数の端末から信号を送出する場合に発生する可能性がある. データをパケット化する処理やその逆の処理を行う, エンコード・デコード時間  $T_{\text{radio}}$  は以下の式で表される.

$$T_{\text{radio}} = \frac{8D}{B_{\text{radio}}} \quad (13)$$

また, 端末  $\alpha$  から電波として放出されるまでの伝送時間  $T_{\text{ether}}$  は以下の式で表される.

$$T_{\text{ether}} = \frac{8D}{B_{\text{ether}}} \quad (14)$$

端末  $\alpha$  から端末  $\beta$  まで到達するのにかかる時間  $T_{\text{ipdelay}}$  は, 無線通信や電子回路の中を通過する時間を無視すると, 端末  $\alpha$  が信号をエンコードする時間を  $T_{\text{radio}}$ , パケットを送信する時間を  $T_{\text{ether}}$ , 端末  $\beta$  がパケットを受信する時間を  $T_{\text{ether}}$ , 信号をデコードする時間を  $T_{\text{radio}}$ , キューイング遅延  $T_{\text{queue}}$  として以下の式で表される.

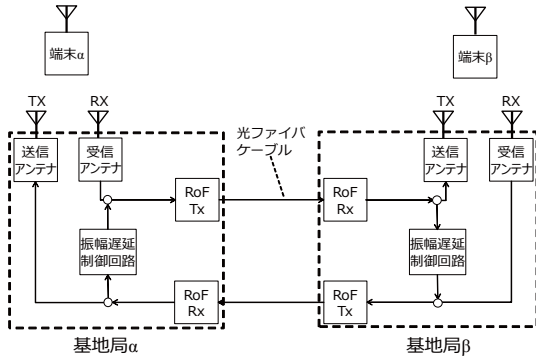


図 9: 評価環境

$$\begin{aligned}
 T_{\text{ipdelay}} &= T_{\text{radio}} + T_{\text{ether}} + T_{\text{trans}} + T_{\text{ether}} + T_{\text{radio}} + T_{\text{queue}} \\
 &= T_{\text{trans}} + \frac{16D}{B_{\text{radio}}} + \frac{16D}{B_{\text{ether}}} + T_{\text{queue}} \quad (15)
 \end{aligned}$$

したがって IP ネットワークを用いた場合のラウンドトリップタイム  $T_{\text{iprtt}}$  は以下ようになる。

$$T_{\text{iprtt}} = 2T_{\text{trans}} + \frac{32D}{B_{\text{radio}}} + \frac{32D}{B_{\text{ether}}} + T_{\text{queue}} \quad (16)$$

#### 4.4 遅延の比較

表 1 に本稿で述べた提案システムと IP ネットワークの RTT の内訳を示す。本実験の提案システムは光ファイバ 1 本を占有しているため、IP ネットワークを用いた場合に考えられるキューイング遅延は発生しない。一方で、提案システムではエンコード・デコード時間が必要とならないため、キューイング遅延の大小に関わらず IP ネットワークより通信遅延が改善される。

表 1: 提案システムと IP ネットワークの RTT の内訳

	伝搬遅延	伝送遅延	エンコー ド遅延	キューイ ング遅延
提案シ ステム	$\frac{2d}{C_{\text{rof}}}$	$\frac{32D}{B_{\text{ether}}}$	—	—
IP ネット ワーク	$2T_{\text{trans}}$	$\frac{32D}{B_{\text{ether}}}$	$\frac{32D}{B_{\text{radio}}}$	$T_{\text{queue}}$

## 5. 評価

### 5.1 評価環境

図 9 に評価環境を示す。光ファイバで接続された IoT 通信エリア拡張システムを介して、端末  $\alpha$  が端末  $\beta$  にパケットを送信する。端末  $\alpha$  の送信回路 (Tx) と端末  $\beta$  の受信回路 (Rx) は、Texas Instruments 製 CC2531F128 と Silicon Labs 製 C8051F360 を用いた。端末  $\alpha$  の送信電力は 3 dBm である。

基地局は大きく分けて送信アンテナ、受信アンテナ、振幅遅延制御回路、RoF 送信機 (RoF Tx)、RoF 受信機 (RoF Rx)、キャリアレーション用送信回路で構成される。基地局の振幅遅延制御回路として振幅制御チップに Skyworks

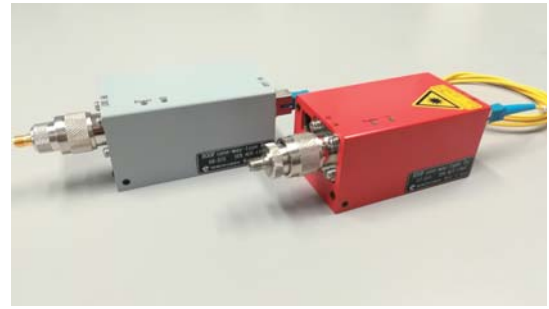


図 10: RoF 送信機・受信機



図 11: シールドボックス内の評価環境

製 SKY12343-364LF、遅延制御チップに M/A-Com Technology Solutions 製 MAPS-010164)、キャリアレーション用送信回路として Texas Instruments 製 CC2531F128 と Silicon Labs 製 C8051F360、RoF 送信機・受信機に精工技研製 ET-615、ER-615 を用いた。図 10 に本稿で利用した RoF 送信機・受信機を示す。光ファイバは長さ 20 km のものを用いた。40 km の実験を行う場合は 20 km の光ファイバをアダプタで 2 つ繋いで実験を行った。

実験環境において端末  $\alpha$  と端末  $\beta$  の間で直接無線通信が行われないように、端末  $\alpha$  と基地局  $\alpha$ 、端末  $\beta$  と基地局  $\beta$  をそれぞれシールドボックスに入れた。図 11 にシールドボックスに端末と基地局を入れた状態の評価環境の画像を示す。シールドボックスのシールド性能は約 50 dB である。実験準備として、始めにキャリアレーション用送信回路から無変調連続波を発生させて逆位相同振幅信号を生成するための遅延制御回路のパラメータをキャリアレーションした。

### 5.2 パケットエラーレート

提案システムにおいて、光ファイバの長さや端末・基地局間の距離を変更した際の、端末  $\alpha$  から端末  $\beta$  へのパケット送信のパケットエラーレート (PER: Packet Error Rate)

表 2: パケットエラーレート対光ファイバの長さ

光ファイバの長さ [km]	PER
20	0.0
40	$8.1 \times 10^{-2}$

表 3: パケットエラーレート対端末・基地局間距離

端末・基地局間の距離 [cm]	PER
10	0.0
50	0.0
100	0.0
200	$2.4 \times 10^{-3}$

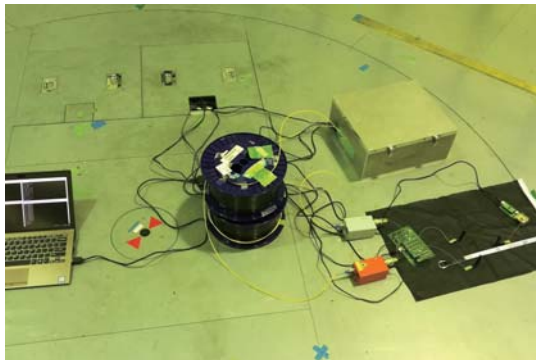


図 12: 端末・基地局の距離を変更する場合の評価環境

を評価した。端末  $\alpha$  が端末  $\beta$  に対してパケットを送信して、端末  $\beta$  は端末  $\alpha$  に対して ACK を返信する。端末  $\alpha$  は ACK が 1 ms 以内に返ってこない場合には再送を行う。再送回数は標準の IEEE 802.15.4 に基づいて最大 3 回として、3 回再送を行っても ACK が返ってこなければパケットエラーとした。時間の計測には 1.6 MHz の 16-Bit Timer を用いた。各試行回数は 100,000 回とした。

#### 光ファイバの長さを変えた場合の評価

まず、基地局間の光ファイバの長さを 20, 40 km に変更して評価した。各端末・基地局間の距離は 10 cm とした。表 2 に評価結果を示す。光ファイバの長さを 20 km とした実験では、パケットエラーは検出されなかった。光ファイバの長さを 40 km とした実験では、約 8.1 % のパケットエラーが検出された。これは、光ファイバが長くなることで受信信号強度が低下したためだと考えられる。本実験の環境において、端末  $\alpha$  が受信した ACK の RSSI (Received Signal Strength Indication) 値を計測したところ、20 km の場合には約  $-59$  dBm, 40 km の場合には  $-71$  dBm となった。

#### 端末と基地局との距離を変えた場合の評価

基地局間の光ファイバの長さを 20 km とし、基地局  $\beta$  と端末  $\beta$  間の距離を 10 cm から 200 cm に変更して評価した。評価環境を 12 に示す。シールドボックス内の端末を  $\alpha$  とし、基地局  $\beta$  と端末  $\beta$  の間の距離を変更する。表 3 に評価結果を示す。端末・基地局間の距離が 10, 50, 100 cm

表 4: 遅延対光ファイバの長さ

光ファイバの長さ [km]	遅延 [ $\mu$ s]
20	770
40	966

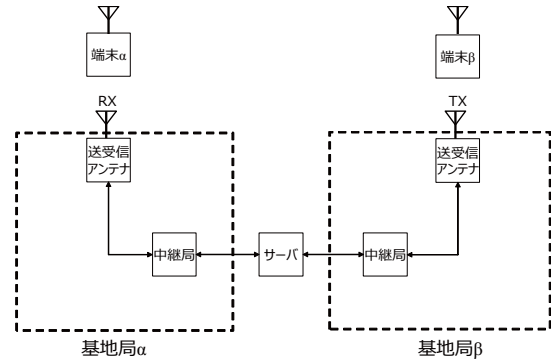


図 13: IP ネットワークを中継した場合の評価環境

の場合にはパケットエラーは検出されなかった。端末と基地局間の距離を 200 cm とした場合には約 0.24 % のパケットエラーが検出された。本実験環境においては端末と基地局間の距離を 200 cm 以上に延長することができていない。端末  $\alpha$  が受信した RSSI 値を計測したところ、10, 50, 100 cm の場合にはそれぞれ  $-50$ ,  $-62$ ,  $-68$  dBm, 200 cm の場合には  $-74$  dBm であった。距離減衰の影響によってパケットエラーが発生したのと考えられる。

### 5.3 往復遅延

提案システムの低遅延性を示すために、端末  $\alpha$  がパケットの送信を完了してから端末  $\alpha$  が端末  $\beta$  からの ACK を受信し終わるまでの時間を遅延として計測した。

#### ファイバの長さを変えた場合の評価

RoF における光ファイバの長さを変えた場合の遅延時間を計測した。表 4 に実験結果を示す。光ファイバの長さが 20 km の時に  $770 \mu$ s, 40 km の時に  $966 \mu$ s であった。提案システムは、遠隔操作を実現するために目標となる 1 ms 以下の低遅延通信を実現できる。

#### IP ネットワークを中継した場合の往復遅延

類似技術との比較として、IP ネットワークを中継して通信を行う場合の遅延時間を計測した。図 13 に評価環境を示す。設置したサーバは端末間の IP ネットワークとして動作する。端末  $\alpha$  から基地局  $\alpha$  に対して送信されたパケットが設置したサーバを経由して基地局  $\beta$  に到達、基地局  $\beta$  から端末  $\beta$  に送信される。研究室内のネットワークに基地局  $\alpha$ ,  $\beta$  とサーバを設置して、計測したところ遅延時間は約 17 ms となった。ACK のタイムアウト時間をはるかに超えているため、IP ネットワーク経由で通信した場合には IEEE 802.15.4 の通信規格を変更せず利用することができない。

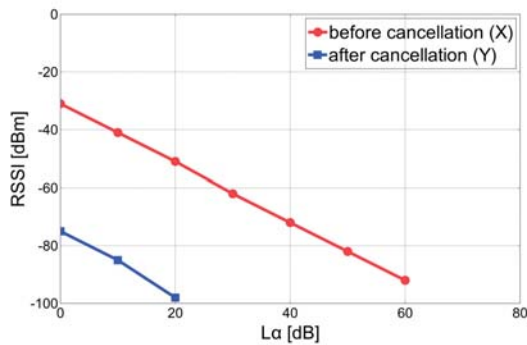


図 14: 自己干渉除去前後の RSSI の比較

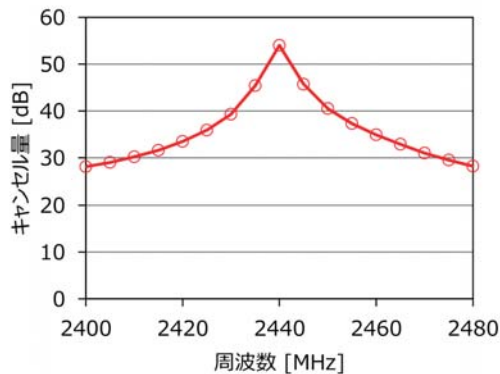


図 15: アナログキャンセル回路のキャンセル性能

## 5.4 実験結果と理論式の比較

### 振幅遅延制御回路の性能評価

理論式との比較に用いる基礎データを得るために、振幅遅延制御回路の自己干渉除去性能の評価を行った [18]. 具体的には、送信端末からパケットを送信して、拠点  $\beta$  での自己干渉除去前後で RSSI の測定を行った. 図 14 に結果を示す. 振幅遅延制御回路によって約 45 [dB] の自己干渉除去が行われている. 提案システムの提案は自己干渉除去量を 40 [dB] と仮定して行っており、本実験で確認された 45 [dB] の自己干渉除去量はこれを上回っている. 課題である信号の無限ループによる増幅が解消されることで、受信端末での SNR (Signal-to-Noise Ratio) の向上が見込まれる.

図 15 にアナログキャンセル回路の特性を示す [19]. この回路は横軸が周波数、縦軸が中心周波数を 2440 [MHz] の信号でキャリアブレーションした場合のキャンセル量を示している. 最大で約 54 [dB] の自己干渉除去を実現している.

キャンセル性能を向上させる方法として信号の分配を増やすことが考えられるが、回路のサイズが課題となる. 現在の設計では、複数に分けた信号の遅延と振幅を調整して再び合成することで、位相と振幅の精密な制御を行っている. 複数に分配した信号は伝送線間の距離が近い場合に、信号やインピーダンスが干渉してしまうため、一定以上の距離を離さなければならず、結果として回路が大きくなる.

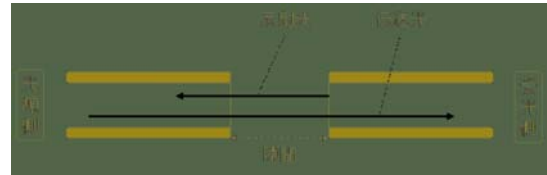


図 16: コネクタ接続端面隙間での反射

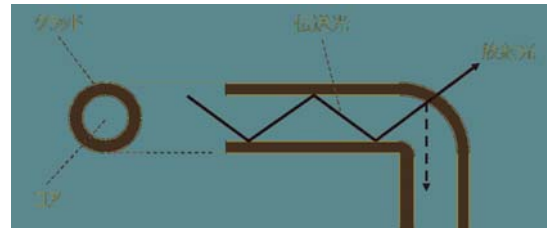


図 17: 光ファイバの曲がりによる放射

また全二重無線通信の研究では、干渉除去の性能向上のためアナログ信号だけではなくデジタル信号に対しても干渉除去を行っている [20], [21], [22]. 例えば、文献 [22] では、アナログ信号とデジタル信号に対する干渉除去を専用の送受信機に実装することで最大 110dB もの高い干渉除去性能を達成している. しかしながら、本研究の目的である低遅延の観点からデジタル信号処理による遅延が問題となる.

### SNR の比較

式 (8) を用いて 5.2 で計測した RSSI の検証を行う.  $L_{\text{rf}}(d)$ ,  $L_{\text{opt}}(d)$  はそれぞれ以下の式を用いた.

$$L_{\text{rf}}(d) = 10 \times 2.5 \log_{10}(d) + 30, L_{\text{opt}}(d) = \frac{0.2d}{1000} \quad (17)$$

筆者らが全二重無線通信用に開発したキャンセル回路 [23], IEEE 802.15.4 の仕様、市販の製品を参考に  $P_{\text{tx}}$  は 0 [dBm],  $A_{\text{rof}}$  は 3 [dB],  $N_{\text{Frof}}$  は 16 [dB],  $L_{\text{ant}}$  は 20 [dB],  $C$  は 40 [dB],  $N$  は -100 [dBm], とし、 $d_{\alpha, \beta}$  が 20,000 [m] または 40,000 [m] である場合について計算した.

計算の結果、 $d = 20,000, 40,000$  [m] の時、端末  $\beta$  において受信した信号の RSSI はそれぞれ  $d = -41, -45$  [dBm] となる. しかしながら、本実験において計測された RSSI はそれぞれ  $d = -59, -71$  [dBm] となった.

この原因として、光ファイバにおける損失が考えられる. 1 つ目が光ファイバの接続損失である. 本実験では、20 km の光ファイバをコネクタにより接続して光ファイバの長さを 40 km とした. コネクタ接続では、光ファイバの端面同士を接触させて接続するため、連続したほかの箇所にはない反射が発生する. 図 16 にコネクタ接続の端面に隙間がある場合の例を示す. 図 16 に示すように接続端面に隙間がある場合、隙間の空気中で接続された光ファイバ端面の屈折率の違いから光が反射する. この反射減衰量が大い光伝送用の光源側に跳ね返って障害を発生させるため、PER が低下する原因となる. ほかに光ファイバの延伸方法として光ファイバを溶かしてから接続する融着も考え



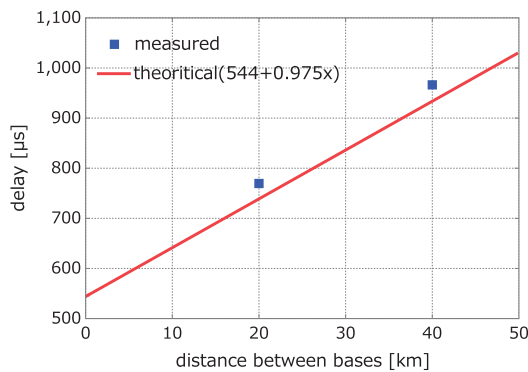


図 18: 遅延時間の計算値と検証結果との比較

られる。融着する方法では、コネクタ接続に比べて反射は抑えられる一方で光の散乱が大きくなる。

2つ目が曲げ損失である。図 17 に光ファイバの仕組みを示す。光ファイバは屈折率の高い材質で作られたコアを屈折率の低いクラッドで覆う構造をもち、光信号はこれらの境界面を反射して進む。そのため、境界面での入射角によっては反射せずにコアからクラッドへ光が通り抜ける放射と呼ばれる現象が発生することがある。光ファイバの曲がり具合や波長が長くなることによって、放射による損失は大きくなる。複数回の実験において光ファイバの状態を同様のものとするのは非常に難しいため具体的な測定は行っていないが、放射による損失と考えられる結果が得られることがあった。例えば、狭い電波暗箱内で光ファイバが大きく曲がっていた場合にはほぼ通信ができなくなった。他の要因として、端末同士の直接通信を極力抑えるため電波暗箱の配線のための穴も極力小さくしているため、この部分に側面からの圧力が加わって曲げ損失が発生していることも考えられる。

本来光ファイバ自体における損失は非常に少ない。光ファイバアンプの利用などにより、提案システムを用いて更なる通信距離の延伸が可能であるといえる。一方で、長距離の光ファイバの敷設には上に挙げたような損失要因が考えられる。通信距離が延びるほどに敷設時・敷設後の光ファイバの状態が通信性能に大きな影響を及ぼすことが想定される。

#### 往復遅延の比較

本稿の実験環境における計算上の遅延時間について述べる。光速を  $c = 2.998 \times 10^8$  [m/s]、光ファイバの屈折率  $n = 1.46$  として、光ファイバ内の光の速度を  $c_{\text{rof}}$  [m/s] を求めると、

$$c_{\text{rof}} = c \div n = 2.053 \times 10^8 \text{ [m/s]} \quad (18)$$

となる。従って端末  $\alpha$  から送信されたパケットが 20 km の長さの光ファイバを通過するのに約  $97.5 \mu\text{s}$  が必要となる。端末  $\beta$  が信号を受け取ると、 $192 \mu\text{s}$  の待ち時間の後に 1 byte あたり  $32 \mu\text{s}$  で 11 byte の ACK を送信する。端末

$\beta$  から送信された ACK は同様に 20 km の長さの光ファイバを通過して端末  $\alpha$  へと送信される。つまり端末  $\alpha$  が端末  $\beta$  からの ACK を受け取るまでにかかる計算上の遅延時間  $T$  は、

$$T = 97.5 \times 2 + (192 + 32 \times 11) = 739 [\mu\text{s}] \quad (19)$$

となる。同様に計算して拠点間の距離が 40 km の場合の計算上の遅延時間は  $934 \mu\text{s}$  となる。図 18 に計算上の遅延時間と検証結果を比較したグラフを示す。グラフより、検証実験により得られた遅延時間が計算上の遅延時間に近いものとなっている。

提案システムの遅延の比較検証により、提案システムを介して行われる通信は端末での処理による遅延に光ファイバの伝搬遅延を単純に加えたものであることが確認できる。処理による遅延時間は端末の性能や通信方式によって変化する。一方、光ファイバの伝搬遅延は通信距離に比例した遅延時間が発生するため用いる端末による遅延時間の変化はない。したがって実際のアプリケーションにおいて提案システムを介した通信を行う場合には、各アプリケーションにおける要求遅延によって適用可能な通信範囲を計算することが可能である。

例えば、2.1 節においてドローンを用いて数 10 キロメートルの広い農場の映像を用いたモニタリングを行うというアプリケーションシナリオを挙げた。このシナリオに提案システムを適用することを考えると、農場の全域で 1 ms 以下の低遅延通信が実現できるといえる。また 1 ms 以下の低遅延通信が求められるアプリケーションとしてロボットの遠隔操作を挙げた。提案システムにより都市部の管理施設から都市近郊の工場に設置された産業用ロボットの制御を行うことを想定した場合、遠隔操作の要求遅延を満たすことが可能である。

## 6. おわりに

本稿では、振幅遅延制御回路と RoF による IoT 端末同士の通信エリア拡張に関する検証を行った。実験の結果、提案システムは低遅延性を実現しつつ通信エリアを拡張する目的を達成することが確認された。

今後の課題として、実際のアプリケーションシナリオにおいて提案システムの検証を行う必要があると考えている。2.1 節でも挙げた映像伝送を行うドローンを例に挙げると、操作の正確性と映像伝送のための高い伝送速度という 2 つの要件が求められる。したがって提案システムを用いた場合の正確性が保証される通信エリアや、伝送速度への影響などに関するより具体的な検証を行う必要がある。さらに、複数端末間における通信に提案システムを適用した場合に関する検証も必要となると考えている。本稿で行った検証は、提案システムを介した 1 対 1 の通信を対象としたものである。したがって、複数端末間での通信を行った場

合の課題やその解決策についての検証を行う必要がある。

## 謝辞

本研究はJSPS 科研費 (JP16H01718, 18H03231, 19H01101) の支援の下で行った。

## 参考文献

- [1] E. Callway, V. Bahl, P. Gorday, J.A. Gutierrez, L. Hester, M. Naeve, and R.F. Heile, "Home networking with IEEE 802.15.4: a developing standard for low-rate wireless personal area networks," *IEEE Communications Magazine*, vol.40, no.8, pp.70–77, Aug. 2002.
- [2] S. Bhattacharya, and D. Rawat, "Comparative study of remote surgery techniques," 2015 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (IEEE GHTC'15), pp.407–413, Oct. 2015.
- [3] R. Ford, M. Zhang, M. Mezzavilla, S. Dutta, S. Rangan, and M. Zorzi, "Achieving ultra-low latency in 5G millimeter wave cellular networks," *IEEE Communications Magazine*, vol.55, no.3, pp.196–203, March 2017.
- [4] 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.
- [5] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low power wide area networks: An overview," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol.19, no.2, pp.855–873, Jan. 2017.
- [6] B. Vejlgard, M. Lauridsen, H. Nguyen, I.Z. Kovacs, P. Mogensen, and M. Sorensen, "Coverage and capacity analysis of Sigfox, LoRa, GPRS, and NB-IoT," 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (IEEE VTC-Spring'17), pp.1–5, Sydney, Australia, June 2017.
- [7] J. Wu, and W. Zhao, "Design and realization of winter-net: From net of things to internet of things," *ACM Transactions on Cyber-Physical System*, vol.1, no.1, pp.1–12, Nov. 2016.
- [8] A. Abdrabou, and W. Zhuang, "Statistical QoS routing for IEEE 802.11 multihop ad hoc networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.8, no.3, pp.1542–1552, March 2009.
- [9] K. Tamaki, A.H. Raptino, Y. Sugiyama, M. Bandai, S. Saruwatari, and T. Watanabe, "Full duplex media access control for wireless multi-hop networks," *Proceedings of IEEE 77th Vehicular Technology Conference (IEEE VTC-Spring'13)*, pp.1–5, Dresden, Germany, June 2013.
- [10] Y. Wu, G. Zheng, and T. Wang, "Performance analysis of MIMO transmission scheme using single leaky coaxial cable," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.16, pp.298–301, May 2017.
- [11] A. Gupta, and R.K. Jha, "A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies," *IEEE Access*, vol.3, pp.1206–1232, July 2015.
- [12] 新世代モバイル通信システム委員会, "情報通信審議会 情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告," June 2018.
- [13] 山本聖仁, 岩谷洋一, 下平慎一郎, "携帯電話の不感地帯を解消する RoF リモート基地局," *東芝レビュー*, vol.59, no.11, pp.44–46, 2004.
- [14] 宮本健司, *Radio on 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*, Ph.D thesis, 大阪大学 大学院工学研究科 電気電子情報工学専攻, Jan. 2017.
- [15] J.J.H. Ameen, "Dispersion compensating radio over fiber (rof) for 5g radio access network," *ZANCO JOURNAL OF PURE AND APPLIED SCIENCES*, vol.30, May 2018.
- [16] A. Dimitrios, G. Giannis, A. Nikos, I. Nikos, K. K., and A. Hercules, "Analog radio-over-fiber solutions in support of 5g," 2018 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), pp.266–271, May 2018.
- [17] 猿渡俊介, 渡辺尚, "全二重無線通信の実用化に向けた課題と可能性," *電子情報通信学会誌*, vol.101, no.4, pp.387–393, Apr. 2018.
- [18] 石岡卓将, 福井達也, 成川聖, 桐原誉人, 南勝也, 池田智, 木下和彦, 小林真, 木崎一廣, 猿渡俊介, 渡辺尚, "振幅遅延制御回路を用いた RoF による IoT 通信エリア拡張技術の実現性評価," *電子情報通信学会ソサイエティ大会*, pp.1–1, 東京電機大学東京千住キャンパス (東京都足立区), Sept. 2018.
- [19] 木崎一廣, 小林真, 猿渡俊介, 渡辺尚, "新しい無線通信技術の基礎実装," *情報処理学会 マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2018 (DICOMO'18)*, pp.1837–1843, 福井県芦原温泉清風荘 (福井県あわら市), June 2018.
- [20] J.I. Choi, M. Jain, K. Srinivasan, P. Levis, and S. Katti, "Achieving single channel, full duplex wireless communication," *Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom'10)*, pp.1–12, Chicago, IL, USA, Sept. 2010.
- [21] M. Jain, J.I. Choi, T. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, S. Katti, and P. Sinha, "Practical, real-time, full duplex wireless," *Proceedings of the 17th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom'11)*, pp.301–312, Las Vegas, NV, USA, Sept. 2011.
- [22] D. Bharadia, E. McMillin, and S. Katti, "Full duplex radios," *Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (ACM SIGCOMM'13)*, pp.375–386, Hong Kong, China, Aug. 2013.
- [23] M. Kobayashi, R. Murakami, K. Kizaki, S. Saruwatari, and T. Watanabe, "Wireless full-duplex medium access control for enhancing energy efficiency," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol.2, no.1, pp.205–221, March 2018.