

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

石岡 卓将<sup>†</sup> 福井 達也<sup>‡</sup> 成川 聖<sup>‡</sup> 桐原 誉人<sup>‡</sup> 南 勝也<sup>‡</sup> 池田 智<sup>‡</sup> 木下 和彦<sup>‡†</sup>

小林 真<sup>‡† ††</sup> 木崎 一廣<sup>‡†</sup> 猿渡 俊介<sup>‡†</sup> 渡辺 尚<sup>‡†</sup>

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

<sup>‡†</sup> 徳島大学大学院社会産業理工学研究部 <sup>††</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科 <sup>†††</sup> 日本学術振興会特別研究員 DC

1 はじめに

IoT (Internet of Things) 技術の発展にともなって、工業、農業、医療、家庭などで IoT 端末を用いたサービスが普及している。さらに多くの分野で IoT 技術を活用するために、IoT 端末の無線通信エリアを拡張する仕組みが求められている。本稿では RoF (Radio on Fiber) と振幅位相制御回路を組み合わせた通信エリア拡張技術を提案する。

2 IoT 端末の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

本稿で実現する IoT 端末の無線通信エリア拡張技術は、離れた距離にある 2 つの無線通信端末間で低遅延かつ広帯域な通信が求められるアプリケーションへの利用を主に想定している。例えば、ドローンによる遠隔地のモニタリング、遠隔手術、ゲーム、音楽セッション、下水管検査用ロボットなど遠隔で制御したり協調させたりする IoT デバイスでの利用を想定している。

より具体的な例として、IEEE 802.15.4 を制御チャネル、IEEE 802.11 を映像通信用のチャネルとして具備したドローンを用いて数十キロ平方メートルの広い農場の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でドローンを制御する。既存の IEEE 802.15.4 も IEEE 802.11 も数百メートルしか電波が届かないため、ドローンがコントローラの無線通信エリア外に到達した場合にはドローンの制御ができなくなる。

2.2 要件

2.1 節に示したアプリケーションを実現するためには、以下の 3 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、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。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 IoT 端末が存在するため、無線通信規格の変更やアクセスポイントの設置を行うことなくエリアを拡張できることが望ましい。2 つ目は、低遅延通信の実現である。IoT 分野で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には、リアルタイムに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、遅延は 1 ms 以下に収まること望ましい [1]。3 つ目は、高い周波数利用効率である。無線通信において通信エリアを拡張する簡単な方法として電波を強く放出する方法が考えられる。しかしながら、強い電波の放出は周波数利用効率の観点から望ましくない。

2.3 関連研究

IoT 端末のエリア拡張技術として、LPWA (Low Power Wide Area) がある [2]。例えば、SigFox では最大で 50 km の通信が可能である。しかしながら、SigFox で 50 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 バイトのペケットを送るだけで 2.4 s の時間が必要となる。また、50 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、周波数利用効率が悪くなる。

IP ネットワークを介して IoT 端末から放出されたペケットを中継する方法も考えられる [3]。例えば、IEEE 802.15.4 で通信している場合、一度 IEEE 802.15.4 ペケットを PC で受け取ってから IP ペ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 ペケットを送信する方法が考えられる。しかしながら、IP ネットワークは遅延が大きいため、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ペケットをパケットリレー方式に転送する方法も考えられる。まず Store and Forward 方式 [4] を用いた場合には、ホップ毎にデコード時間・エンコード時間を要するため、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リレー [5] 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は Store and Forward 方式同様悪化する。

3 提案システム

2 節の議論を基に、RoF を用いた無線通信エリア拡張技術を提案する。RoF を用いることで、ペケットのエンコードデコードを行わないため低遅延化でき、光ファイバの帯域を利用できるので数 Gbps の通信も提供できる。

しかしながら、単純に RoF を用いて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問題が発生する。図 1 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の問題を示す。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よって、無限ループが生じて通信できなくなる。

このような電波の無限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 2 に提案システムの全体像を示す。図 2 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。

図 3 にループ問題の解消に用いる振幅遅延制御回路を示す。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。また、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ループ信号となる。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 評価

4.1 評価環境

図 4 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  $\beta$  にペケットを送信する。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 CC8051F360 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)、キャリアプ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 製 SKY12343-364LF、遅延制御チップに M/A-Com Technology Solutions 製 MAPS-010164、キャリアプレーション用送信回路として Texas Instruments 製 CC2531F128 と Silicon Labs 製 CC8051F360、RoF 送信機・受信機に精工技研製 ET-615、ER-615 を

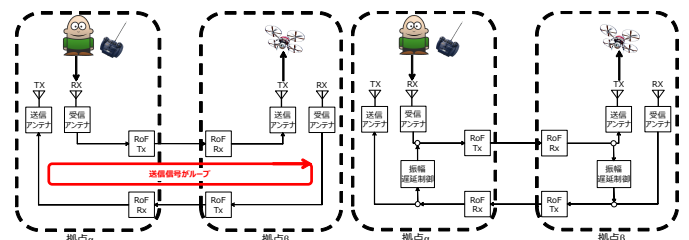


図 1: 自己干渉による信号ループの問題



図 2: 提案システム

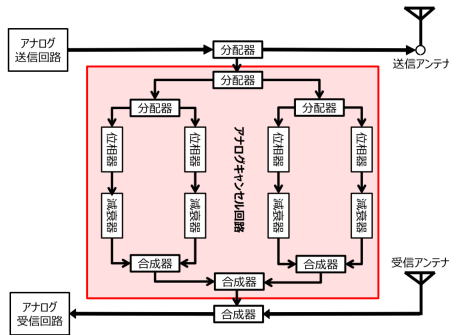


図 3: 振幅遅延制御回路の詳細

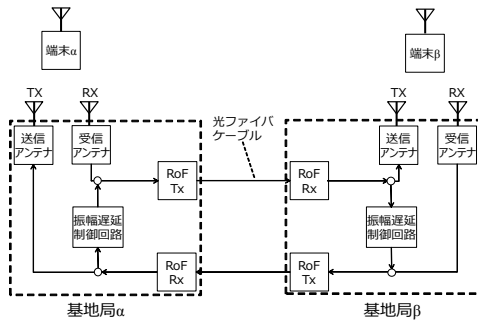


図 4: 評価環境

表 1: パケットエラーレート  
対ファイバの長さ

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

表 2: 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	$2.4 \times 10^{-3}$

用いた。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。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。

#### 4.2 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) 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 1 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 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 として、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。基地局  $\beta$  と端末  $\beta$  は電波暗室に入れた。表 2 に評価結果を示す。端末・基地局間の距離が 10, 50, 100 cm 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。端末  $\alpha$  が受信した RSSI 値を計測したところ、10, 50,

表 3: 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

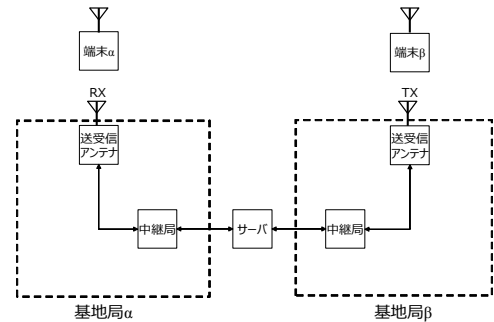


図 5: IP ネットワークを中継した場合の評価環境

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ものと考えられる。

#### 4.3 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 3 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。本システムは、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ことが分かる。

#### IP ネットワークを中継した場合の遅延

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 5 に評価環境を示す。端末  $\alpha$  から基地局  $\alpha$  に対して送信されたパケットが IP ネットワーク上の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。アプリケーションが要求する遅延は 1 ms であるため、IP ネットワークを中継して通信を行った場合の遅延は要件を満足していない。

#### 5 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、本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本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に例を挙げると、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 つの要件が保証される必要がある。今後は本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予定している。

#### 謝辞

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

#### 参考文献

- [1] 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).
- [2] Raza, U., Kulkarni, P. and Sooriyabandara, M.: Low Power Wide Area Networks: An Overview, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, Vol. 19, No. 2, pp. 855–873 (2017).
- [3] Wu, J. and Zhao, W.: Design and Realization of WInternet: From Net of Things to Internet of Things, *ACM Transactions on Cyber-Physical System*, Vol. 1, No. 1, pp. 1–12 (2016).
- [4] Abdrabou, A. and Zhuang, W.: Statistical QoS routing for IEEE 802.11 multihop ad hoc networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 8, No. 3, pp. 1542–1552 (2009).
- [5] Tamaki, K., Raptino, A. H., Sugiyama, Y., Bandai, M., Saruwatari, S. and Watanabe, T.: Full Duplex Media Access Control for Wireless Multi-hop Networks, *Proceedings of IEEE 77th Vehicular Technology Conference (IEEE VTC-Spring'13)*, Dresden, Germany, pp. 1–5 (2013).