

# 全二重無線通信の実用化に向けた課題と可能性 (完全版)\*

猿渡 俊介 渡辺 尚  
大阪大学大学院情報科学研究科

平成 30 年 4 月 2 日

## 1 はじめに

全二重無線通信は面白い。だが課題が多すぎて実用的ではない。このように考えていた時期が著者らにもあった。ところが、研究を進める中で、徐々に全二重無線通信がデータ通信容量を 2 倍にできる以上の可能性があることが分かってきた。

まずは全二重無線通信の歴史を簡単に振り返る。以降では無線 LAN を想定して議論することに注意されたい。無線通信の分野では、一般的に、同じ周波数帯で同時に送受信することは不可能であると考えられていた。例として図 1 に IEEE 802.11n において 6 Mbps で通信する場合を示す。IEEE 802.11n において 6 Mbps の通信レートで通信する際の最小受信感度は約  $-82$  dBm である。自端末の送信電力が 20 dBm、相手端末からの信号が  $-82$  dBm で届くとすると、受信する信号の電力の約 160 億倍の信号を自端末から送信することになる。ノイズフロアを  $-90$  dBm とすると送信電力 20 dBm の場合では 110 dB もの自己干渉除去を行わなければならない。全二重通信は実質不可能であると考えられていた。

このような事実を受け、無線通信の著名な教科書で

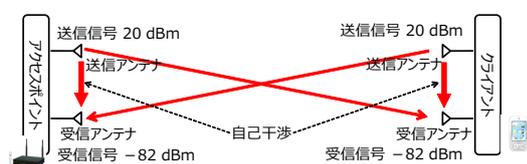


図 1: 2 つの端末が同時に送信する場合、

\*本論文は電子情報通信学会誌 2018 年 4 月号に投稿した「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, 2018.”の原稿の拡張版である。ページ数の制限で掲載することができなかった参考文献等を加えたものになっている。

ある文献 [1] には、

It is generally not possible for radios to receive and transmit on the same frequency band because of the interference that results.

と記載されている。しかしながら Stanford の Sachin Katti らのグループにより 2010 年の ACM Mobicom で全二重無線通信を各端末 3 本のアンテナを用いて最初の実証が発表されてから [2], 2011 年に各端末 2 本のアンテナ [3], 2013 年に各端末アンテナ 1 本かつ干渉信号を 110 dB キャンセルして IEEE 802.11ac の通信を同時かつ双方向で成功した論文 [4] が発表された。全二重無線通信を実現するためのハードウェアに関して 2 節で詳細に述べる。

ACM MobiCom 2010 において不可能だと思われていた全二重無線通信が実証された論文が発表された当初、著者らは率直に「すごい、面白い」と感じた。一方で、いくつかの観点から実際に使われることはないだろうと考えていた。例えばハードウェアコストを MIMO 通信と比較した場合、2 倍の通信容量を実現するのに必要なアンテナの数、AD/DA 変換器の数、アンプの数は等しいものの、全二重無線通信の方がアナログキャンセル回路分だけ高コスト化する。それ以外にも全二重無線通信が抱える問題は多い。全二重無線通信が抱える問題に関しては 3 節で詳細に述べる。

ところが、2013 年の文献 [4] においてアンテナ 1 本かつ 110 dB のキャンセルの成功が報告されると全二重無線通信の研究が世界中で活発化して行った。例えば、無線通信の著名な会議である IEEE Globecom では、2010 年に 0 件、2011 年に 1 件、2012 年に 3 件、2013 年に 7 件であった全二重無線通信の発表は、2014 年に 17 件、2015 年に 28 件、2016 年に 27 件、2017 年

に 27 件と急激に増加した。半導体に関する世界最大の国際会議である ISSCC でも、2017 年に全二重無線通信のフロントエンドを対象としたセッションも組まれている [5, 6, 7]。さらに、全二重無線通信を応用した新たな可能性も示され始めている。全二重無線通信の可能性を 4 節で議論し、最後に 5 節でまとめとする。

## 2 全二重無線通信の仕組み

全二重無線通信の仕組みを理解するための準備として、既存の半二重無線通信器の仕組みを説明する。図 2 に既存の半二重無線通信器の構成要素を示す。既存の半二重無線通信器は端末本体、制御回路、デジタル送信回路、デジタル受信回路、アナログ送信回路、アナログ受信回路、送受信アンテナから構成される。端末本体は PC やスマートフォン上のオペレーティングシステムを実行している CPU である。制御回路は主にメディアアクセス制御プロトコルを実行する機構であり、ASIC や CPU で実現される。デジタル送信回路・デジタル受信回路は符号化復号化や変調復調を行う機構であり、ASIC 上のデジタル回路として実現される。アナログ送信回路・アナログ受信回路は AD/DA 変換や信号増幅を行う機構であり、アナログ回路として実現される。送受信アンテナは電波を送受信するアンテナである。半二重通信では 1 つのアンテナを送信時と受信時に切り替えて共有している。

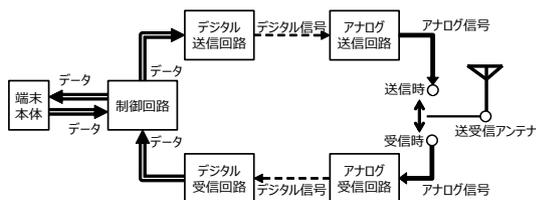


図 2: 既存の半二重無線通信器の構成要素

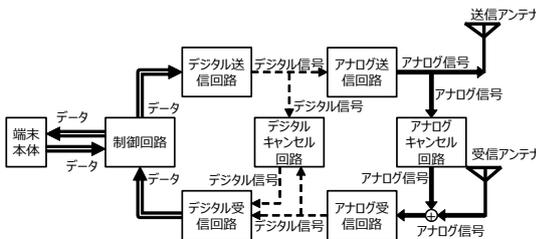


図 3: 全二重無線通信器の構成要素

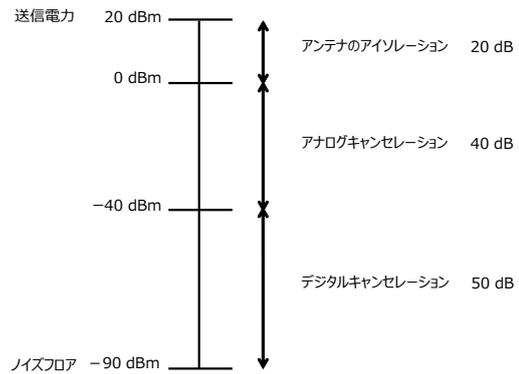


図 4: 無線 LAN に適用する場合に必要なキャンセル量の目安

図 3 に全二重無線通信器の構成を示す。既存の半二重無線通信器と比較すると、全二重無線通信器では送信アンテナと受信アンテナを分離して、アナログ送信回路・アナログ受信回路の間にアナログキャンセル回路を、デジタル送信回路・デジタル受信回路の間にデジタルキャンセル回路を挿入した構成になっている。送信アンテナから受信アンテナに入ってきた信号をアナログキャンセル回路で自己干渉除去を行った後に、デジタルキャンセル回路でさらに自己干渉除去を行うことで相手端末からの信号のみを抽出して受信する。

図 4 に各要素と全体におけるキャンセル量の目安を示す。送信電力が 20 dBm、ノイズフロアが -90 dBm であることを想定している。送信アンテナから送信された 20 dBm の信号は、送信アンテナと受信アンテナのアイソレーションで約 20 dB 減衰して 0 dBm の信号になる。受信アンテナから入力された自己干渉信号はデジタル信号に変換される前にアナログキャンセル回路によって約 40 dB の自己干渉除去が行われて、AD 変換器によって約 -40 dBm のデジタル信号となる。最後に、デジタルキャンセル回路によって約 50 dB の自己干渉除去が行われて、全ての自己干渉除去信号がキャンセルされる。各要素におけるキャンセル量は目安であることに注意されたい。個々のキャンセル量に関しては 2.1 節、2.2 節、2.3 節で詳細に述べる。

### 2.1 アンテナ

全二重無線通信のアンテナでは、自分が送信アンテナから送信した信号が受信アンテナに回り込むのをい

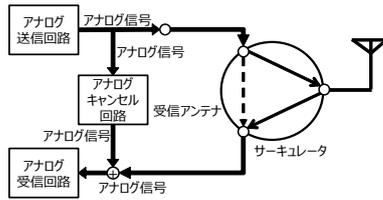


図 5: サーキュレータを用いた 1 本のアンテナによる全二重無線通信

かに少なくするかが重要である．送信アンテナから受信アンテナの回り込みを少なくすることで後段のアナログキャンセル回路とデジタルキャンセル回路の負荷を軽くすることができる．

研究段階の技術としては，送信アンテナと受信アンテナのアイソレーションを大きくする手法やアンテナ数を少なくする方法が検討されている．例えば，図 3 の構成でアンテナの距離が 20 cm，通信周波数帯が 2.4 GHz の時では約 30 dB 減衰する．文献 [8] では，2 つのダイポールアンテナ周辺に 5 つの寄生素子を等間隔に配置したアンテナ構成を取ることで約 50 dB の自己干渉抑制を実現している．自己干渉抑制性能は低下するものの，サーキュレータを用いてアンテナ 1 本で送信信号と受信信号を実現した例も存在する．図 5 に文献 [4] で用いられているフロントエンド部を示す．送信信号と受信信号とアンテナをサーキュレータでブリッジすることで，全二重無線通信における送信と受信を 1 本のアンテナで実現している．サーキュレータを用いた構成において，文献 [4] では約 15 dB のアイソレーションが確認されている．文献 [9] では，指向性アンテナを用いて自己干渉を抑制する方法が検討されている．

## 2.2 アナログキャンセル回路

自己干渉除去においてアナログ段とデジタル段の 2 段階を踏むのはアナログ受信回路に AD 変換器が存在するからである．相手からの信号よりも自分の信号の方が 10 万倍～100 億倍と大きい場合，AD 変換器の手前である程度の量を自己干渉除去しなければ AGC による信号強度制御と AD 変換器による量子化で相手からの信号が失われる．AD 変換器の分解能を IQ それぞれ 10 bit とすると，デジタル回路のダイナミックレンジは 60 dB となる．ダイナミックレンジのマーヅを 10 dB，自端末の送信信号を 20 dBm，ノイズフロ

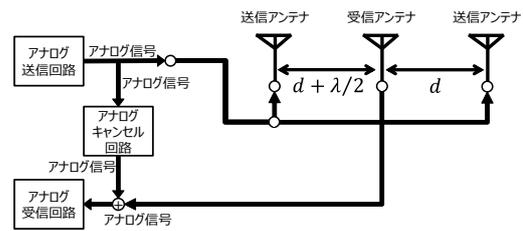


図 6: 送信アンテナ 2 本，受信アンテナ 1 本を用いた全二重無線通信

アを  $-90$  dBm，アンテナ間の減衰を約 20 dB とすると， $110$  dB  $- 20$  dB  $- (60$  dB  $- 10$  dB)  $= 40$  dB をアナログキャンセル回路で自己干渉除去する必要がある．

アナログキャンセル回路では，自分が送信している信号の逆位相かつ同振幅の信号を生成して受信信号に重畳することで自分が送信している信号のみを除去する．文献 [2] では，図 6 のように同じ信号を出力する 2 本のアンテナを受信アンテナからそれぞれ  $d$  と  $d + \lambda/2$  離して受信アンテナにおいて逆位相の信号が重畳するようにすることで，約 20 dB のキャンセルに成功している．(アンテナを用いているものの，アナログ領域で逆位相の波を生成してキャンセルを行うという観点で本稿ではアナログキャンセルに分類している．)

また，アナログキャンセル回路は能動素子を用いたものと受動素子のみを用いたものに分類することができる．能動素子を用いたアナログキャンセル回路は小型化がしやすいものの，アンプや局所発振器などの消費電力が発生する部品を用いる．文献 [3] では，バランと地デジ・携帯電話用のアクティブ型の干渉除去チップ QHx220 を組み合わせることで，約 40 dB の自己干渉除去を実現している．

それに対して，受動素子のみを用いたアナログキャンセル回路では，減衰器や遅延線など入力信号に対して受動的に動作するため，自己干渉除去時の消費電力が発生しない．ただし，キャリアレーション時には受動素子のみをもちいた場合でも素子の設定変更のための消費電力は発生することに注意されたい．文献 [4] では数十 ps から数千 ps と遅延の異なる 16 の遅延線と各遅延線を通る信号の振幅を減衰器で制御することで 80 MHz の帯域において平均で約 55 dB の自己干渉除去を実現している．

図 7 に筆者らが開発した受動素子のみを用いたアナログキャンセル回路 [10] の構成を示す．図 7 のアナロ

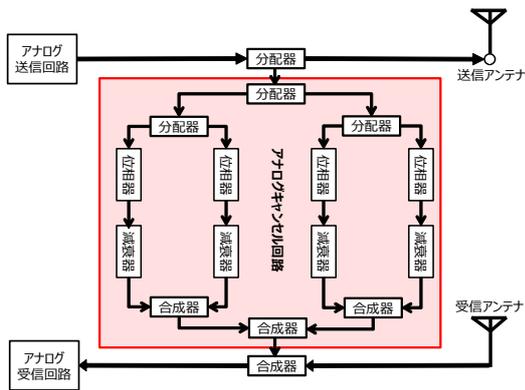


図 7: アナログキャンセル回路の詳細

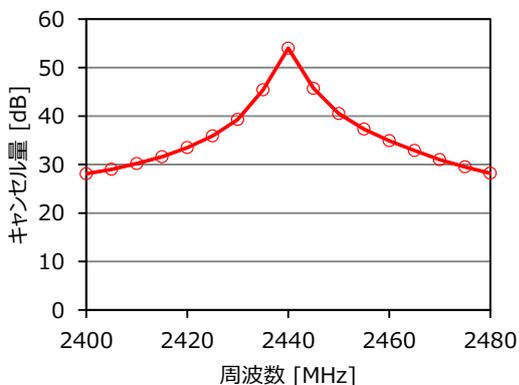


図 8: アナログキャンセル回路のキャンセル性能

アナログキャンセル回路では、アナログ送信回路から出力されたアナログ信号を分配器でキャンセル回路と送信アンテナ両方に入力する。アナログキャンセル回路に入力された信号は、分配器ですらに 4 つに分割される。4 つに分割した信号の位相と振幅をそれぞれ独立に調節した上で再度合成することで、振幅と位相の制御分解能を向上することができる。図 8 に開発したアナログキャンセル回路の特性を示す。横軸が周波数、縦軸が中心周波数を 2440 MHz の信号でキャリアレーションした場合のキャンセル量を表している。最大で約 54 dB の自己干渉除去を実現していることが分かる。

### 2.3 デジタルキャンセル回路

デジタルキャンセル回路は、アナログキャンセル回路によって除去しきれなかった信号を除去する機構である。2.2 節で述べたとおり、無線通信器の AD 変換器

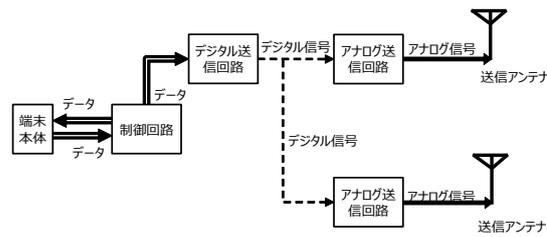


図 9: MIMO 送信器

のダイナミックレンジである 50 dB のキャンセルをデジタル信号処理で行う必要がある。アナログキャンセル回路が物理的な制約から複雑な干渉除去が実現できないのに対して、デジタルキャンセル回路では FPGA や ASIC 上で実現されるため、複雑なデジタル信号処理も適用することが可能である。

単純な方法としては、DA 変換器に入力したデジタル信号を保持しておいて、受信アンテナから回り込んだ信号と相関を取り、相関のピークを検出した部分で回り込んだ信号から元のデジタル信号を減算する方法が考えられる。このような単純な方法を用いて文献 [2] では約 10 dB の干渉除去に成功している。文献 [3] では、自分が送信した信号を受け取った際にプリアンブルでチャンネル推定を行い、チャンネルを反映した信号を生成してからキャンセルすることで約 25 dB の干渉除去に成功している。ただし、チャンネル推定を行う場合、自分が送信している信号のプリアンブル部分が相手からの信号とは衝突していないことが前提である。文献 [2] と文献 [3] が線形成分のみの干渉除去を行っているのに対して、文献 [4] では非線形性をモデル化して高調波をもキャンセルすることで約 48 dB の干渉除去に成功している。

## 3 全二重無線通信の課題

2 節で述べたように、自己干渉除去性能の観点では無線 LAN に全二重無線通信が適用可能であることが既の実証されている。しかしながら、自己干渉除去以外の観点での課題は残っている。

### 3.1 ハードウェアコスト

全二重無線通信では自己干渉除去が 100 % 成功した場合に、理論的な限界として半二重通信の 2 倍の通信

容量を達成することができる。一方で、送信側と受信側でそれぞれアンテナを2本ずつ用いた $2 \times 2$ のMIMO通信でも理論的には通信容量はアンテナを1本使った $1 \times 1$ の半二重通信の2倍となる。図9にアンテナが2本の場合のMIMO送信器の構成を示す。アンテナが2本のMIMO送信器は、端末本体、制御回路、デジタル送信回路が各1つ、アナログ送信回路が2つ必要となる。MIMO通信の受信側では、図9の構成において送信回路が全て受信回路になった構成となる。2倍の通信容量を達成するのに一度の通信で送信と受信を合わせて必要となるアンテナ数、アナログ送受信回路の数、デジタル送受信回路の数、制御回路数は全二重無線通信とMIMO通信で等しい。しかしながら、全二重無線通信の方だけ送信側と受信側双方においてアナログキャンセル回路とデジタルキャンセル回路の両方が必要となる。

回路のサイズの観点でもキャンセル回路が課題となる。デジタルキャンセル回路はASICやFPGA上に実装することで小型かつ高速にできるので問題にはならないと考えている。しかしながら、アナログキャンセル回路に関してはキャンセル量を増やそうとすると現状では回路サイズが大きくなる。アナログキャンセル性能を高めるためには、位相と振幅の精密な制御が必要である。現状では、信号を分配器で複数に分けてから分けた信号の遅延と振幅を調節して再び合成することで制御粒度を向上させている。複数に分配した信号は伝送線間の距離が近い場合には信号やインピーダンスが干渉するため、一定以上の距離を離さなければならず、結果として回路サイズが大きくなる。

### 3.2 上位層へのプロトコルへの影響

全二重無線通信においてキャンセルが成功し、かつ上記のハードウェア的な問題が全て解決したとする。その場合でも、上位層のプロトコルを適切に設計しなければ全二重無線通信の性能を十分に発揮することができない。

まず考えられるのがトラヒックの非対称性の問題である。アクセスネットワークでは、下り(ダウンロード)トラヒックの方が上り(アップロード)トラヒックよりも2倍~3倍ほど大きいことが知られている。全二重無線通信では、アクセスポイントとユーザ端末の

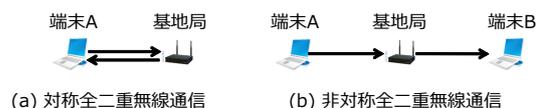


図 10: 対称全二重無線通信と非対称全二重無線通信

双方が同じサイズのフレームを送信する場合にしか達成される通信容量は2倍にならない。

トラヒックの非対称性を緩和する方法として、非対称全二重無線通信を利用することが考えられる。図10-(a)に対称全二重通信を、図10-(b)に非対称全二重通信を示す。図10-(a)の対称全二重通信では、1つの基地局と1つの端末の間で同時にフレームを交換する。図10-(b)の非対称全二重通信では、1つの基地局と2つの端末で通信を行う。具体的には、基地局が端末Aからのフレームを受信しつつ送信端末とは異なる端末Bへとフレームを送信する。このような仕組みを実現することで、端末Aと端末Bが半二重無線通信のみに対応した端末であったとしても全二重無線通信による利益を享受することができる。

しかしながら、非対称全二重通信を導入すると新たな課題が発生する。例えば、位置関係によっては図10-(b)における端末Aの送信が端末Bに届いてしまい、基地局から端末Bへの送信と衝突するが発生しうる[11]。また、端末Aと基地局、基地局と端末Bの距離が異なる場合には送信レートも異なるため、レート制御をどのようにするかの問題も生じる。さらに、既に標準化されている半二重通信端末やMIMO端末と全二重無線通信端末をどのように共存するかも考えなければならない。

## 4 全二重無線通信の可能性

3節に示した課題を眺めると、全二重無線通信は導入するメリットが少ないように感じるかもしれない。しかしながら、世界中で全二重無線通信の研究が活発になる中で、徐々にこれらの課題は解決され始めている。例えば、半導体に関する世界最大の国際会議であるISSCCで発表された文献[12]では、サーキュレータと同様の機能を半導体チップ上に実現することに成功している。また、2017年のISSCCでは全二重無線通信のフロントエンドを対象としたセッションも登場

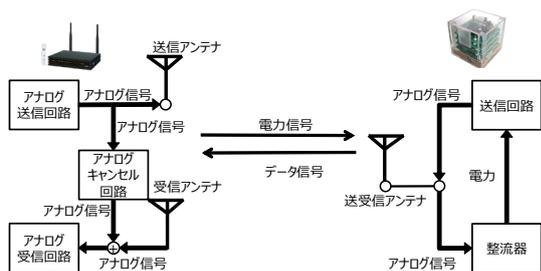


図 11: 無線電力伝送

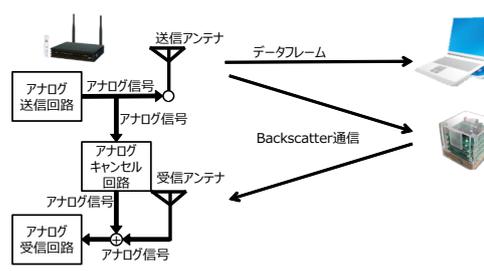


図 12: Backscatter 通信

した [5, 6, 7] . さらに , 全二重無線通信が通信容量の増加以外の面でもメリットがあることが分かってきている .

#### 4.1 無線電力伝送

IoT への応用において , 全二重無線通信を用いることでセンサノードに電波で電力を供給しながらセンサノードからのセンサデータを受信することが可能となる [13] . 図 11 に全二重無線通信と無線電力伝送の例を示す . 各センサノードは , 基地局からの電力をレクテナで受信して電力を獲得しつつ , 基地局に対して定期的にセンサデータを送信する . 一方で , 基地局は , センサノードに対して電波を用いて電力を伝送しつつ , 電力信号による自己干渉を除去することでセンサデータを受信する .

電波は有限の資源であるため , 全二重無線通信を用いて電力とデータとで周波数資源を共有することは重要である . 電波を用いて電力を送信する場合 , 電波法によって周波数当たりの最大送信電力は制限される . すなわち , 基地局から伝送する電力量を増やす場合には広帯域で信号を送信する必要がある . 電波を用いた無線電力伝送では , 基地局は通常のデータ通信と同じ回路を用いて電力も伝送することができる . また , センサノードの観点から見ると , できるだけ多くの時間基地局が電波を送信してくれた方が得られる電力が多くなる .

#### 4.2 Backscatter 通信

IoT への応用として全二重無線通信が役立つもう 1 つの例が Backscatter 通信である . Backscatter 通信とは , 送信側で搬送波を作り出すことなく , アンテナの



図 13: 中継通信

インピーダンスをスイッチで高速に切り替えるだけでデータを送信する技術である . 具体的には , 自ら電波を放射するのではなく , 環境に存在する TV や WiFi などの電波を反射 / 吸収することで電波をオンオフするように変調をかけてデータを伝送する . Backscatter 通信では送信側での増幅器が不要となるため , 数十  $\mu W$  でデータを送信することができる . 主にパッシブ RFID で用いられてきた技術であるが , ここ数年の研究で Backscatter 通信を用いて WiFi や Lora での通信を行うことに成功し始めている [14, 15] . Backscatter 通信と全二重無線通信を組み合わせることで , 基地局に対して Backscatter 通信の搬送波生成機能とデータフレーム受信機能を同時に持たせることができる . 図 12 に Backscatter 通信と全二重無線通信を組み合わせた例を示す . 自身が送信したフレームの信号を全二重無線通信で自己干渉除去することで , 他の端末にフレームを送りつつ Backscatter 通信機能を備えたセンサからの情報も受信可能となる .

#### 4.3 中継通信・協調通信

IoT 以外の応用として考えられるのが協調通信や中継通信への適用である . 3.2 節に示した非対称全二重通信は 1 つの基地局と 2 つの端末での通信であったが , 端末 , 中継局 , 基地局でも非対称全二重無線通信を利用することができる . 図 13 に中継通信の例を示す . 端末と基地局が半二重無線通信 , 中継局が全二重

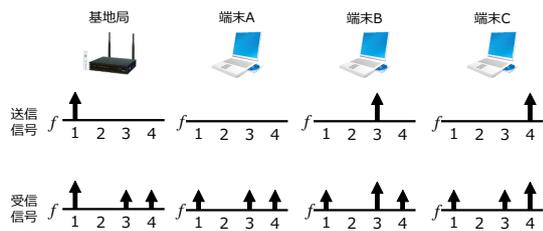


図 14: OFDM のサブキャリアを用いた同時情報交換

無線通信を行うとする。中継局は端末から受信した信号を受信しながら基地局に対して送信することができる [16, 17]。全二重無線通信機能を具備した中継局を用いることで、通信レートを損なうことなく通信距離を延長したり、協調通信を用いて通信容量を増加したり [18] することができる。

#### 4.4 制御情報の交換

全二重無線通信の「同時に通信可能」という特性は、通信容量の増加だけでなく制御情報の交換に利用することもできる。例えば、レートレス符号 [19, 20] を用いた無線通信やコグニティブ無線通信で制御情報を高速にフィードバックするのに利用することができる。レートレス符号を用いた無線通信において、送信側が符号語を送り続け、受信者が復号に成功した時点で送信側に復号が成功したことを通知することで、送信側が符号語の送信を停止したとする。送信を停止した時点で送信済みの符号語の総数とその時のチャネル状態における適切な伝送レートと一致する。これまでの無線通信では、受信側が復号に成功した時点で直ちに送信側に復号が成功したことを通知する方法が存在しないことが問題であった。全二重無線通信を用いることで、復号成功の通知の問題を解決することができる。同様に、コグニティブ無線通信でも、プライマリユーザの利用によって直ちにセカンダリユーザの送信を停止しなければならない場合にセカンダリユーザが通信中であっても瞬時に要停止を通知することができる。

全二重無線通信において送信回路と受信回路を同時に利用可能という特性を利用することで、端末間での同時情報交換を OFDM のサブキャリアを利用して行うことができる [21, 22, 23]。例として、図 14 に基地局や各端末が送るべきフレームを持っているか持っていないかをネットワーク全体で共有する場合を考える。

基地局、端末 A、端末 B、端末 C が存在した場合に、それぞれがフレームを保持しているかどうかを OFDM のサブキャリアの 1 つ目、2 つ目、3 つ目、4 つ目にそれぞれ対応付ける。図 14 では、基地局、端末 B、端末 C がフレームを保持しているとする。基地局と各端末では、自身に割り当てられているサブキャリア信号を送る場合に端末が送るべきフレームを保持しており、送らない場合に保持していないことを意味するとする。フレームを保持している基地局と端末がタイミングを揃えて同時にサブキャリアを送信すると、全二重無線通信のように送信回路と受信回路を同時に動かしていればネットワーク全体の情報を相互かつ同時に交換することができる。ランダムバックオフの時間オーバーヘッドの短縮 [21] や衝突回避に利用する手法 [23] が提案されている。

## 5 おわりに

本稿では、全二重無線通信の仕組み、課題、可能性について述べた。多くの問題が解決され始めているが、解決が難しい本稿では触れていない問題が存在する。長距離通信への全二重無線通信の適用である。本稿での議論は無線 LAN、すなわち屋内に基地局を設置して通信距離もせいぜい数十 m のものを想定していた。セルラ網など通信距離が大きい領域で全二重無線通信を利用することを考えると、送信電力の大きさと遅延波の存在が問題となる。特に遅延波が大きく遅れる場合には、アナログキャンセル回路で大きな遅延を生成する仕組みが必要となる。

また、4 節の議論を踏まえると、全二重無線通信は単に通信容量を 2 倍にするという単純な話ではなく、次世代の無線通信のアーキテクチャの議論なのではないかと考えている。2011 年の粗いコンセプト実証からわずか 6 年で 110 dB の自己干渉除去が実現され、半導体コミュニティも参戦し始めている。実用的であるかどうかはさておき、全二重無線通信が幅広い層の研究者の創造性を刺激する素材であることは確かなようである。研究者の知的好奇心に感謝しつつ、今後も面白い展開に期待したい。

## 参考文献

- [1] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, Aug. 2005.
- [2] J.I. Choi, M. Jain, K. Srinivasan, P. Levis, and S. Katti, "Achieving single channel, full duplex wireless communication," *Proceedings of the 16th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom'10)*, pp.1–14, Sept. 2010.
- [3] M. Jain, J.I. Choi, T.M. 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, Sept. 2011.
- [4] 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, HongKong, China, Aug. 2013.
- [5] T. Zhang, A. Najafi, C. Su, and J.C. Rudell, "A 1.7-to-2.2GHz full-duplex transceiver system with >50dB self-interference cancellation over 42MHz bandwidth," *Proceedings of the 2017 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC'17)*, pp.314–315, Feb. 2017.
- [6] Y.H. Kao, H.C. Chou, Y.J.W. Chun Chieh Peng, B. Su, and T.S. Chu, "A single-port duplex RF front-end for X-band single-antenna FMCW radar in 65nm CMOS," *Proceedings of the 2017 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC'17)*, pp.318–319, Feb. 2017.
- [7] N. Reiskarimian, M.B. Dastjerdi, J. Zhou, and H. Krishnaswamy, "Highly-linear integrated magnetic-free circulator- receiver for full-duplex wireless," *Proceedings of the 2017 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC'17)*, pp.316–317, 2017.
- [8] 轡見眞太郎, 宮路祐一, 上原秀幸, "広帯域な自己干渉抑制を達成する寄生素子を用いたアンテナ構成," *電子情報通信学会技術研究報告, アンテナ・伝搬 (AP) 研究会*, pp.1–5, Nov. 2016.
- [9] K. Miura and M. Bandai, "Node architecture and MAC protocol for full duplex wireless and directional antennas," *Proceedings of the 2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (IEEE PIMRC'12)*, pp.369–374, Nov. 2012.
- [10] 猿渡俊介, 木崎一廣, 小林 真, 渡辺 尚, "メディアアクセス制御の検証が可能なソフトウェア無線全二重通信機的设计," *電子情報通信学会総合大会*, pp.1–1, March 2017.
- [11] K. Tamaki, Y. Sugiyama, A. Raptino, M. Bandai, S. Saruwatari, and T. Watanabe, "Full duplex media access control for wireless multi-hop networks," *Proceedings of the IEEE 77th Vehicular Technology Conference (IEEE VTC'13-Spring)*, pp.1–6, June 2013.
- [12] J. Zhou, N. Reiskarimian, and H. Krishnaswamy, "Receiver with integrated magnetic-free N-path-filter-based non-reciprocal circulator and baseband self-interference cancellation for full-duplex wireless," *Proceedings of the 2017 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC'16)*, pp.178–179, Feb. 2016.
- [13] K. Yamazaki, Y. Sugiyama, Y. Kawahara, S. Saruwatari, and T. Watanabe, "Preliminary evaluation of simultaneous data and power transmission in the same frequency channel," *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE WCNC'14)*, pp.1–6, May 2015.
- [14] B. Kellogg, V. Talla, S. Gollakota, and J. Smith, "Passive Wi-Fi: Bringing low power to Wi-Fi transmissions," *Proceedings of the 13th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (USENIX NSDI'16)*, pp.1–14, March 2016.

- [15] V. Talla, M. Hassar, B. Kellogg, A. Najafi, J. Smith, and S. Gollakota, “LoRa backscatter: Enabling the vision of ubiquitous connectivity,” Proceedings of the ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (ACM UbiComp’17), pp.1–24, Sept. 2017.
- [16] K. Yamamoto, K. Haneda, H. Murata, and S. Yoshida, “Optimal transmission scheduling for a hybrid of full- and half-duplex relaying,” IEEE Communications Letters, pp.305–307, March 2011.
- [17] D. Bharadia and S. Katti, “FastForward: Fast and constructive full duplex relays,” Proceedings of the 2014 ACM conference on SIGCOMM (ACM SIGCOMM’14), pp.199–210, Aug. 2014.
- [18] I. Krikidis and H.A. Suraweera, “Full-duplex cooperative diversity with alamouti space-time code,” IEEE Wireless Communications Letters, vol.2, no.5, pp.519–522, July 2013.
- [19] R. Palanki and J.S. Yedidia, “Rateless codes on noisy channels,” Proceedings of the 2004 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT’04), p.38, June 2004.
- [20] J. Perry, P.A. Iannucci, K. Fleming, H. Balakrishnan, and D. Shah, “Spinal codes,” Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM’12), pp.49–60, Aug. 2012.
- [21] S. Sen, , R.C. Romit, and S. Nelakuditi, “No time to countdown: Migrating backoff to the frequency domain,” Proceedings of the ACM 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom’11), pp.241–252, Sept. 2011.
- [22] X. Feng, J. Zhang, Q. Zhang, and B. Li, “Use your frequency wisely: Explore frequency domain for channel contention and ACK,” Proceedings of the 31st Annual IEEE International Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM’12), pp.549–557, March 2012.
- [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.387–393, March 2018.