

無線全二重通信におけるエネルギー消費効率化のための MAC プロトコルの追加評価

村上 遼¹ 小林 真^{1,2} 木崎 一廣¹ 猿渡 俊介¹ 渡辺 尚¹

概要: スマートフォン, タブレット, IoT デバイスなどのバッテリーで動作する無線通信端末の爆発的な増加に伴って, 高いエネルギー効率で大容量無線通信を実現することが求められている. 大容量無線通信に向けて, 限られた周波数資源の中で上りと下りを同時伝送することで合わせて 2 倍の伝送レートを実現する無線全二重通信の研究が盛んになされている. 本稿では, 無線全二重通信を用いることで大容量化のみならず, 高いエネルギー効率を実現する「LPFD-PKT (Low Power communication by wireless Full-Duplexing with PacKeT)」に着目する. 具体的には, 無線全二重通信によって通信時間が無線半二重通信の半分になること着目した無線全二重通信向けの省電力モード LPFD-PKT の評価を行う. 評価の結果, LPFD-PKT は既存の無線全二重通信の MAC プロトコル及び無線半二重通信の PSM (Power Saving Mode) と比較して高いエネルギー効率を達成することを示す.

1. はじめに

干渉除去技術の発達に伴って, 無線全二重通信が現実になりつつある [1-4]. 無線全二重通信とは, 1 つの周波数帯で送受信を同時に実現する技術である. ノード A とノード B があつた場合, これまではノード A はデータを送信しながらノード B からのデータを受け取ることができなかった. 電波は距離が離れるにしたがって急激に減衰するため, ノード A 自身が発信する電波がノード B が発信する電波よりもはるかに大きな干渉になるからである. これに対して, アナログ干渉除去技術とデジタル干渉除去技術を組み合わせて無線全二重通信方式を実現することで, 周波数利用効率が 2 倍になることが確認されている [5]. 無線全二重通信をインフラストラクチャネットワークやアドホックネットワークに適用することで, ネットワークのスループットが向上することも確認されている [6-12].

既存の研究が干渉除去性能やスループットの向上を目的としていたのに対して, 本研究では消費電力に着目する. 無線全二重通信の低消費電力を対象とした研究として, 文献 [13] がある. 文献 [13] では, IEEE 802.11 の PSM (Power Saving Mode) と同様に, ピーコン周期に合わせてメディアを ON-OFF することで低消費電力な動作を可能としている. しかしながら, 文献 [13] はあくまでもスリープ制御しない無線全二重通信に比べて低消費電力になることを示しただけであり, 既存の IEEE 802.11 の PSM [14] で動作する無線半二重通信と比較すると消費電力が大きいという問題があつた.

それに対して文献 [15] では, 無線全二重通信が無線通信の低消費電力化にも利用できることに着目している. 無線半二重通信と比較した場合, 無線全二重通信では上りと下りの通信を 1 つにまとめることができるため, 周波数帯域の占有時間を無線半二重通信の半分にすることができる. また, アップリンクとダウンリンクの通信を同時に行うことにより, 電力を消費する回路を共有することもできる. 無線全二重通信における電力モデルに関しては 2 節で詳細に述べる.

このような観点から, 文献 [15] では無線全二重通信を用いた低消費電力無線通信手法「LPFD-PKT (Low Power communication by wireless Full-Duplexing with PacKeT)」が提案されている. LPFD-PKT では, 基地局と各端末におけるバッファ情報と端末間干渉情報を用いて対称全二重通信, 非対称全二重通信, 無線半二重通信をスケジューリングすることで消費電力を削減している. 本稿では, 文献 [15] で提案されている LPFD-PKT を無線ネットワークの様々な状況を想定して詳細に評価した.

本稿の構成は以下の通りである. 2 節では, 本研究で想定しているシステムのモデルを示す. 3 節で文献 [15] で提案されている無線全二重通信による省電力化手法である LPFD-PKT について述べる. 4 節でシミュレーションによる LPFD-PKT の評価を示して, 最後に 5 節でまとめとする.

2. システムモデル

2.1 無線全二重通信

本稿では無線全二重通信機能を具備した 1 台の基地局と N 台の端末から構成されるスター型のワイヤレスネットワークを想定している. 図 1 に本稿で想定しているネットワークを示す. 基地局と各端末は無線半二重通信 (図 1(a)), 対称全二重通信 (図 1(b)), 非対称全二重通信 (図 1(c)) を用いて通信を行う.

図 1(a) の無線半二重通信では, 1 回の通信で基地局から端末, もしくは端末から基地局に対して 1 つのフレームを送信する. 現在, 通常の無線 LAN で行われている通信方式である.

図 1(b) の対称全二重通信では, 1 台の基地局と 1 台の端末が同時にフレームを送受信する. 対称全二重通信を行う場合, ペアとなる基



(a) 無線半二重通信 (b) 対称全二重通信 (c) 非対称全二重通信

図 1 対象とする無線ネットワーク

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科

² 日本学術振興会特別研究員 DC

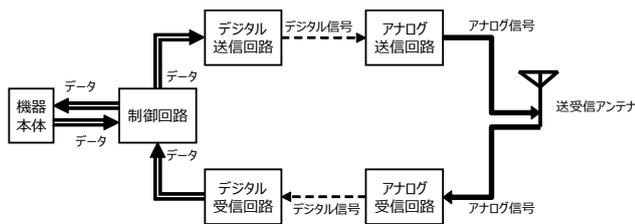


図 2 無線半二重通信のトランシーバ回路

地局と端末は両方とも通信相手を宛先とするフレームを持っている必要がある。

図 1(c) の非対称全二重通信では、1 台の基地局と 2 台の端末でフレームの送受信を行う。端末は 1 つが送信を、もう一方が受信を行う。送信を行う端末は基地局宛のフレームを、基地局は受信を行う端末宛のフレームを持っている必要がある。非対称全二重通信では端末間干渉問題が発生する。端末間干渉問題とは、送信を行う端末から基地局へのフレームの送信が受信を行う端末に対して届くことで受信を行う端末がフレームを受け取ることができなくなる問題である。

2.2 無線半二重通信トランシーバ回路

図 2 に既存の無線半二重通信端末の無線通信回路のモデルを示す。無線半二重通信のトランシーバ回路は、機器本体、制御回路、デジタル送信回路、アナログ送信回路、デジタル受信回路、アナログ受信回路と、1 本の送受信アンテナから構成される。

機器本体は、PC やスマートフォンを想定している。制御回路とパケットのやり取りを行う。制御回路は MAC プロトコルの制御や送信回路・受信回路の ON/OFF の制御などを行う。制御回路が ON の時 $P_{control,on}$ [mW]、OFF の時は $P_{control,off}$ [mW] の電力を消費する。

デジタル送信回路は変調を行う回路である。アナログ送信回路は、DA 変換器でデジタル信号をアナログ信号に変換、アンプで増幅したのちにアンテナを介して電波を送信する回路である。本稿では、デジタル送信回路とアナログ送信回路をまとめて送信回路と呼ぶ。送信回路が ON の時 $P_{tx,on}$ [mW]、OFF の時は $P_{tx,off}$ [mW] の電力を消費する。

アナログ受信回路は通信相手から送られてきた微弱な電波を増幅して AD 変換器でデジタル信号に変換する回路である。デジタル受信回路は復調を行う回路である。本稿では、アナログ受信回路とデジタル受信回路をまとめて受信回路と呼ぶ。受信回路が ON の時 $P_{rx,on}$ [mW]、OFF の時は $P_{rx,off}$ [mW] の電力を消費する。

無線半二重通信の消費電力モデルでは、スリープ時には制御回路、送信回路、受信回路は全て OFF に、送信時には制御回路と送信回路、受信時には制御回路と受信回路が駆動している。

無線半二重通信端末状態と各回路の駆動状態との関係を元に、無線半二重通信端末のスリープ状態、送信状態、受信状態をそれぞれ sleep, tx, rx, 状態 $s \in \{\text{sleep, tx, rx}\}$ の時のトランシーバ回路全体の消費電力を $f_{hd}(s)$ [W] とすると、各状態の消費電力は、

$$\begin{aligned} f_{hd}(\text{sleep}) &= P_{control,off} + P_{tx,off} + P_{rx,off} \\ f_{hd}(\text{tx}) &= P_{control,on} + P_{tx,on} + P_{rx,off} \\ f_{hd}(\text{rx}) &= P_{control,on} + P_{tx,off} + P_{rx,on} \end{aligned}$$

となる。

2.3 無線全二重通信トランシーバ回路

図 3 に無線全二重通信端末の無線通信回路のモデルを示す。無線半二重通信回路との違いは、デジタルキャンセル回路とアナログキャンセル回路が追加されている点である。デジタルキャンセル回路はデ

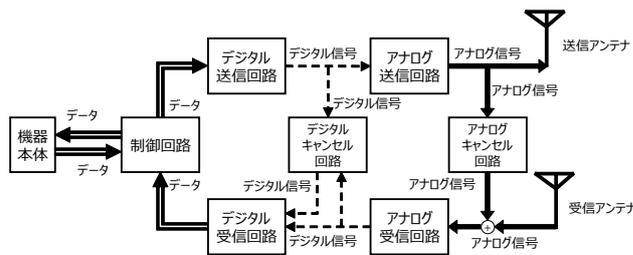


図 3 無線全二重通信のトランシーバ回路

ジタル干渉除去を行う回路である。アナログキャンセル回路はアナログ干渉除去を行う回路である。本稿では、デジタルキャンセル回路とアナログキャンセル回路をまとめてキャンセル回路と呼ぶ。キャンセル回路が ON の時 $P_{cancel,on}$ [mW]、OFF の時は $P_{cancel,off}$ [mW] の電力を消費する。

図 3 では便宜的にアンテナを送信用と受信用に分けて描いている。無線全二重通信の方式によってはアンテナは 1 本しか用いないものも存在する。例えば、文献 [5] では、サーキュレータを用いることでアンテナを共有して無線全二重通信を行う仕組みも提案されている。

無線半二重通信と異なる点は、回路にキャンセル回路が加わったこと、状態に全二重通信が加わったことである。キャンセル回路は全二重通信状態でのみ ON になる。また、全二重通信状態では制御回路、送信回路、受信回路、キャンセル回路の全ての回路が ON になる。

無線全二重通信端末状態と各回路の駆動状態との関係を元に、無線全二重通信端末のスリープ状態、送信状態、受信状態、全二重通信状態をそれぞれ sleep, tx, rx, fd, 状態 $s \in \{\text{sleep, tx, rx, fd}\}$ の時の全体の消費電力を $f_{fd}(s)$ [W] とすると、各状態の消費電力は、

$$\begin{aligned} f_{fd}(\text{sleep}) &= P_{control,off} + P_{tx,off} + P_{rx,off} + P_{cancel,off} \\ f_{fd}(\text{tx}) &= P_{control,on} + P_{tx,on} + P_{rx,off} + P_{cancel,off} \\ f_{fd}(\text{rx}) &= P_{control,on} + P_{tx,off} + P_{rx,on} + P_{cancel,off} \\ f_{fd}(\text{fd}) &= P_{control,on} + P_{tx,on} + P_{rx,on} + P_{cancel,on} \end{aligned}$$

となる。

2.4 エネルギーあたりの送信データ量

本稿では、フレーム送受信におけるエネルギー消費効率の指標としてエネルギーあたりの送信データ量 (BPJ: Bit Per Joule) [bit/J] を用いる。BPJ の値が大きいほど、同じ消費エネルギーで送信できるデータ量が大きい事を示す。BPJ の値は消費電力あたりの送信レート [bps/W] の平均と等しくなる。

2.3 節に示した無線全二重通信の消費電力のモデルにおいて、 $S = \{\text{sleep, tx, rx, fd}\}$ を全ての状態、 t_s [sec.] は状態 s である時間とすると、各端末の消費電力の平均値 \bar{P} [W] は以下の式で表される。

$$\bar{P} = \frac{\sum_{s \in S} f_{fd}(s) t_s}{\sum_{s \in S} t_s}$$

C [bps] を物理層の容量 とすると、スループットの平均値 \bar{R} [bps] は以下の式で表される。

$$\bar{R} = \frac{C(t_{tx} + t_{rx} + 2t_{fd})}{\sum_{s \in S} t_s}$$

各端末の消費電力の平均値 \bar{P} [W]、スループットの平均値 \bar{R} [bps] を用いて、BPJ [bits/J] は以下の式で表される。

$$\text{BPJ}[\text{bits/J}] = \frac{\bar{R}}{\bar{P}}[\text{bps/W}]$$

3. LPFD-PKT

2 節の電力モデルを前提として、無線全二重通信による低消費電力

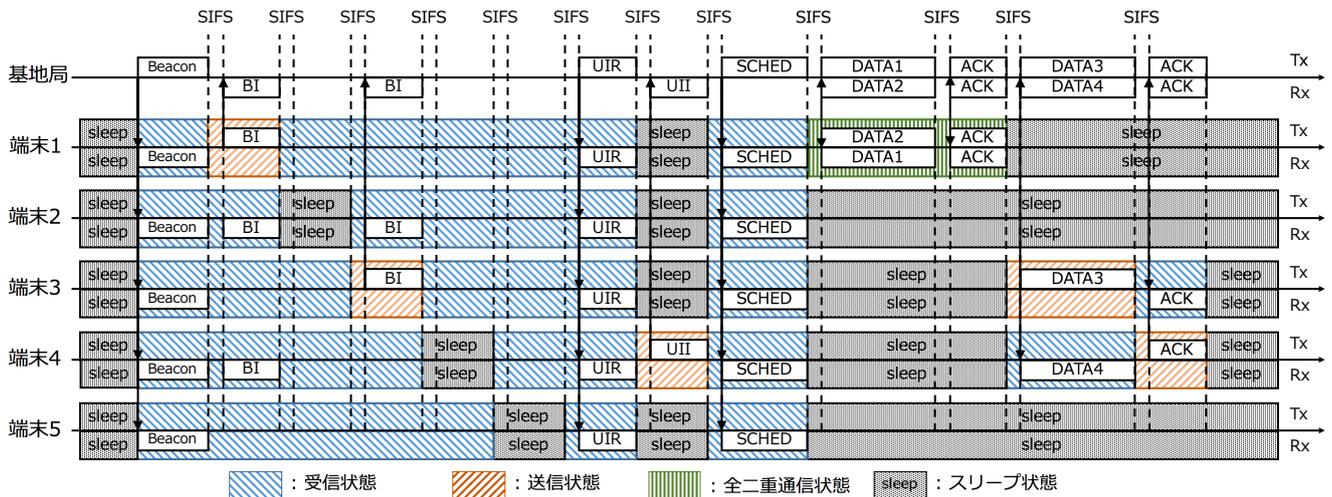


図 4 LPFD-PKT: 動作例

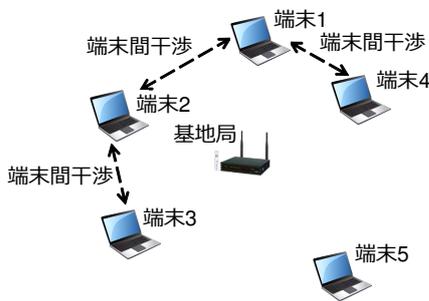


図 5 基地局 1 台と端末 5 台の無線ネットワーク

無線通信を実現する LPFD-PKT (Low Power communication by wireless Full-Duplexing with PacKeTs) が提案されている [15]. LPFD-PKT では、基地局のバッファ状態、各端末のバッファ状態、端末間の干渉情報を元に各フレームを対称全二重通信、非対称全二重通信、無線半二重通信のどれを用いて送受信するかを基地局においてスケジューリングすることで端末の消費電力を削減している。

3.1 LPFD-PKT の動作

LPFD-PKT では、各端末は基地局に接続した後に、

- (1) ビーコンの送受信
- (2) バッファ状態の通知と端末間干渉の計測
- (3) 通信のスケジューリング
- (4) データの送受信と到達確認

の 4 つのフェーズを繰り返しながら通信している。

端末は基地局に接続する際に認証情報を交換すると同時に、基地局へ接続している端末数 N と、自端末の識別子を端末 ID として受け取る。端末 ID は $0 \sim N$ の整数であり、ネットワーク内で基地局や端末を一意に識別するために使用する。0 は基地局を意味する。

図 4 に、図 5 の基地局 1 台と端末 5 台から構成されるトポロジにおける LPFD-PKT のタイムシーケンス例を示す。図 4、図 5 では、ビーコンフレーム受信時点で、基地局が端末 1 宛のデータフレームを 1 つ、端末 4 宛のデータフレームを 1 つ、端末 1 と端末 3 が基地局宛のデータフレームをそれぞれ 1 つずつバッファしていると仮定する。

「(1) ビーコンの送受信」では、基地局が定期的にビーコンフレームを送信する。ビーコンフレームを受信した端末は動作タイミングを基地局と同期する。ビーコンフレームは接続している端末数 N を含んでいる。「(2) バッファ状態の通知と端末間干渉の計測」では、各端末

が BI (Buffer Information) フレームを送信して基地局に対して各端末のバッファ状態を通知すると同時に、端末間干渉を計測する。バッファ状態の通知と端末間干渉の計測の詳細は 3.2 節で述べる。「(3) 通信のスケジューリング」では、基地局は UIR (User Interference Request) フレームと UII (User Interference Information) フレームを用いて各端末から端末間干渉情報を受け取りつつ対称全二重通信、非対称全二重通信、無線半二重通信のスケジューリングする。通信のスケジューリングの詳細は 3.3 節で述べる。「(4) データの送受信と到達確認」では、各端末は基地局が算出したスケジュールを SCHED (SCHEDULE) フレームで受け取ってスケジュールに沿ってデータフレームと ACK (ACKnowledge) フレームを送受信する。データの送受信と到達確認の詳細は 3.4 節で述べる。

3.2 バッファ状態の通知と端末間干渉の計測

バッファ状態の通知と端末間干渉の計測は、3.3 節の通信のスケジュールで使用する情報を取得するために行う。対称全二重通信を用いることで端末の電力効率を向上することができるため、基地局は対称全二重通信が発生するように端末のバッファ状態を収集して基地局と端末間のデータフレームと ACK フレームの送受信をスケジューリングする。また、基地局が端末間干渉の情報を収集することで、端末間干渉が発生しないように非対称全二重通信のスケジューリングを行う。非対称全二重通信を行ったときに端末間干渉が発生すると、端末が基地局からのダウンリンク受信のために消費した電力が無駄になるからである。

全ての端末はビーコン間隔毎にスリープ状態からアウェイク状態に移行して、基地局からのビーコンフレームを受信する。ビーコンフレームを受信した端末は、端末 ID に割り当てられた順で BI フレームを送信する。BI フレームは、BI フレーム送信元の端末 ID と、その端末がバッファに保持しているデータフレームの数を含んでいる。図 4 の例では、基地局宛のデータフレームをバッファしている端末 1 と端末 3 は基地局宛のデータフレームを 1 つずつそれぞれバッファしていることを基地局に対して通知している。一方で、基地局宛のデータフレームをバッファしていない端末 2、端末 4、端末 5 は BI フレームの送信を指定された期間はスリープ状態へ移行して消費電力を削減する。

端末間干渉を測定するために、全ての端末は他の端末の BI フレームの送信がスケジュールされている期間はアウェイク状態で他の端末が送信する BI フレームを待ち受ける。図 4 の例では、端末 2 は

端末 1 と端末 3 からの BI フレームを受信したため、端末 1, 端末 3 と端末間干渉が発生すると判断する。端末 4 は端末 1 からの BI フレームのみを受信したため、端末 1 とのみ端末間干渉が発生すると判断する。端末 1, 端末 3, 端末 5 は他の端末からの BI フレームを受信しないため、端末間干渉は発生しないと判断する。

3.3 通信のスケジューリング

通信のスケジューリングでは、基地局は端末から受信した BI フレームを用いて通信のスケジューリングを行う。LPFD-PKT では、高いスループットを維持したまま省電力効果を高めることを目的として

- (1) 対称全二重通信
- (2) 非対称全二重通信
- (3) 無線半二重通信

の順にスケジューリングする。

まず、対称全二重通信のスケジューリングを行う。具体的には、対称全二重通信が可能なアップリンクとダウンリンクの組み合わせを決定する。図 4 の例では、基地局に端末 1 宛のデータフレームが 1 つ、端末 1 に基地局宛のデータフレームが 1 つバッファされているため、基地局は 1 サイクル目に端末 1 との間での対称全二重通信をスケジューリングする。

次に、非対称全二重通信のスケジューリングを行う。非対称全二重通信のアップリンクとダウンリンクの組み合わせを決定するために、基地局は UIR フレームと UII フレームを用いて端末からの端末間干渉の情報を収集する。UIR フレームは、非対称全二重通信のダウンリンクの候補全ての端末 ID を UII フレームの送信スケジュールとして含んでいる。UIR フレームに自端末の端末 ID が含まれていた端末は、端末 ID の順番に従って UII フレームを基地局に返信する。UII フレームは、UII フレーム送信元の端末と端末間干渉が発生する端末の端末 ID 全てを含んでいる。端末間干渉は 3.2 節で述べた BI フレームを用いた計測結果を用いる。

図 4 の例では、基地局は UIR フレームを用いて、非対称全二重通信のダウンリンクの宛先の候補である端末 4 に UII フレームの送信を要求する。UIR フレームを受信した端末 4 は、基地局に UII フレームを送信する。端末 4 は端末 1 と端末間干渉が発生することを通知する。

端末から収集した端末間干渉の情報を元に、基地局は非対称全二重通信のアップリンクとダウンリンクの組み合わせを決定する。具体的には、基地局は端末間干渉が発生しないように非対称全二重通信のアップリンクとダウンリンクの組み合わせを生成する。図 4 の例では、基地局は端末 3 に 1 つ基地局宛のデータフレームがバッファされていることを把握している。また、基地局には端末 4 宛のデータフレームが 1 つずつバッファされている。端末 3 と端末 4 の間では端末間干渉が発生しないため、基地局はアップリンク送信元が端末 3, ダウンリンク宛先を端末 4 とする非対称全二重通信を 2 サイクル目としてスケジューリングする。

3.4 データの送受信と確認応答

データの送受信と到達確認では、まず、全ての端末は基地局からの SCHED フレームを受信するためにスリープ状態からアウェイク状態へ移行する。基地局は SCHED フレームを送信して、全端末にデータフレームの送信順を通知する。SCHED フレームは、何サイクル目のアップリンク送信元がどの端末で何サイクル目のダウンリンク宛先がどの端末かの情報を含んでいる。基地局と端末は SCHED フレームに記載されたスケジュールに従ってデータフレームと ACK フレームの送受信を行う。

図 4 の例では、スケジュールの 1 サイクル目はアップリンク送信元が端末 1・ダウンリンク宛先が端末 1 の対称全二重通信、2 サイクル目はアップリンク送信元が端末 3・ダウンリンク宛先が端末 4 の非対称全二重通信となる。各端末と基地局は SCHED レームで通知された送信順でデータフレームと ACK フレームを送受信する。各データフレームと ACK フレームの送受信に関係しない端末はスリープすることで電力を節約する。

4. 評価

LPFD-PKT の基礎的な性能を確かめるために、計算機シミュレーションを用いて性能を評価した。

4.1 評価環境

性能評価では、1 台の基地局に N 台の端末が接続するスター型のワイヤレスネットワークを用いて評価した。端末は基地局から縦横 50 [m] の範囲内に全てランダムに設置した。基地局と端末は送信電力 10 [dBm] でフレームを送信する。ダウンリンクトラヒックは各端末に対して到着率 λ_{down} [frame/sec.] のポアソン過程に従って基地局に発生して、アップリンクトラヒックは到着率 λ_{up} [frame/sec.] のポアソン過程に従って各端末に発生するものとした。フレームの衝突以外でフレームロスは発生しないものとした。基地局と端末は共に固定フレームサイズで 6 [Mbps] の送信レートで送信した。無線全二重通信では理想的な自己干渉除去が可能で、自己干渉除去による伝送レートの低下はないものとした。

各フレームのサイズは IEEE 802.11 標準に基づいて定義した [14]。1500 [byte] と 40 [byte] のペイロードを $(1 - \alpha) : \alpha$ の割合で発生させて、28 [byte] のヘッダを付け加えたものをデータフレーム (1528 [byte], 68 [byte]) とした [16]。ACK フレームのサイズは 14 [byte]、ビーコンフレームのサイズは 28 [byte]、PS-Poll フレームのサイズは 20 [byte] とした。本稿では、LPFD-PKT で用いるフレームのサイズを以下のように決定した。BI フレームのサイズは 28 [byte]、 $n_{\text{requested}}$ 個の端末に端末間干渉情報を要求する場合の UIR フレームのサイズは $20 + 6n_{\text{requested}}$ [byte]、 $n_{\text{interference}}$ 個の端末と干渉が発生することを通知する場合の UII フレームのサイズは $20 + 6n_{\text{interference}}$ [byte]、 $n_{\text{scheduled}}$ サイクルのデータフレームと ACK の送受信をスケジューリングする場合の SCHED フレームのサイズを $20 + 6n_{\text{scheduled}}$ [byte] とした。SIFS 時間は 16 [$\mu\text{sec.}$] とした。

各回路の消費電力は Wi-Fi のチップセット (SX-SDCAG 802.11a/b/g SDIO Card Module) に基づいて定義した [17]。 $P_{\text{control,on}} = 3.00 \times 10^2$ [mW], $P_{\text{tx,on}} = 5.25 \times 10^2$ [mW], $P_{\text{rx,on}} = 1.95 \times 10^2$ [mW], $P_{\text{control,off}} = 4.95 \times 10^1$ [mW], $P_{\text{tx,off}} = 0.00$ [mW], $P_{\text{rx,off}} = 0.00$ [mW], $P_{\text{cancel,off}} = 0.00$ [mW] とした。現在、無線全二重通信で用いるキャンセル回路の既成品は存在しない。そのため、4.3 節では $P_{\text{cancel,on}}$ を 0 [mW] から 2000 [mW] に変化させて評価した。また、現在図 6 のキャンセル回路ボードを用いた評価も進めている。測定の結果、図 6 のキャンセル回路ボードの消費電力は約 30 [mW] であったため、4.2 節、4.4 節及び 4.5 節の評価でのキャンセル回路の消費電力は 30 [mW] ($P_{\text{cancel,on}} = 30$ [mW]) とした。

評価では、以下の 4 方式を比較した。

(1) LPFD-PKT

3 節で示した文献 [15] で提案されている方式である。

(2) LPHD-PKT

LPHD-PKT は LPFD-PKT から無線全二重通信によるデータ送受信を取り除いた MAC プロトコルである。具体的には、スケジュールを決定する際に無線全二重通信によるデータ送受信

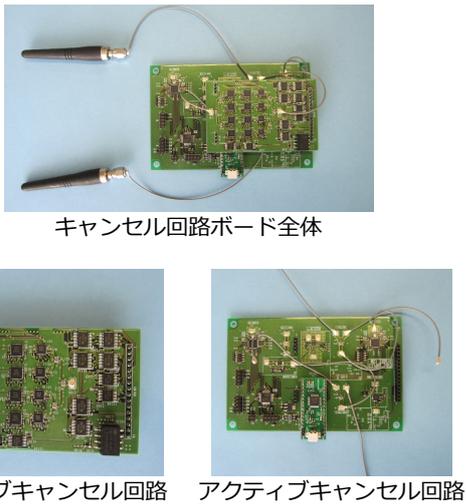


図 6 評価中のキャンセル回路ボード

をスケジューリングしない。LPHD-PKT の結果は無線全二重通信によるエネルギー効率向上の指標となる。

(3) HDPSM (Half Duplex Power Saving Mode)

現在の IEEE 802.11 で用いられている無線半二重通信の PSM を想定している [14]。既存の無線 LAN における低消費電力プロトコルの性能指標となる。

(4) RTS/FCTS

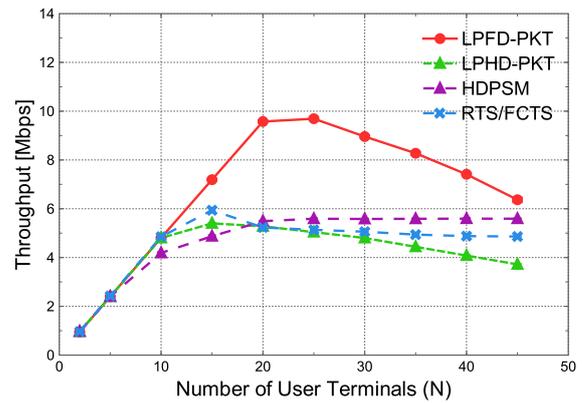
通常の全二重通信の通常動作モードである。文献 [9] の MAC プロトコルを想定している。RTS/FCTS の結果は既存の無線全二重通信の MAC プロトコルの性能指標となる。

4.2 端末数に対する評価

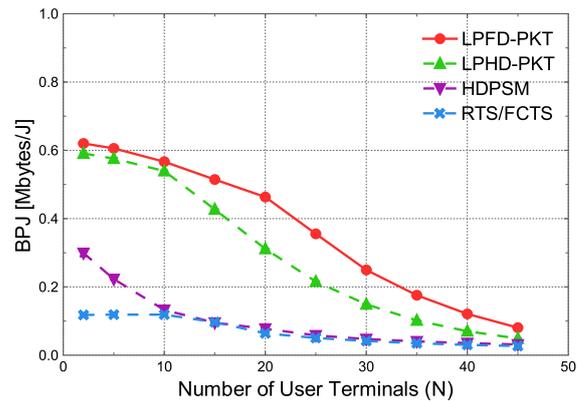
LPFD-PKT の基礎的な性能を確認するために端末数 N を変化させて評価を行った。ダウンリンクトラフィックは各端末に対して到着率 20 [frame/sec.] ($\lambda_{down} = 20$ [frame/sec.]) のポアソン過程に従って基地局に発生して、アップリンクトラフィックは到着率 20 [frame/sec.] ($\lambda_{up} = 20$ [frame/sec.]) のポアソン過程に従って発生するものとした。発生するトラフィックのペイロードのサイズは全て 1500 [byte] ($\alpha = 0$, データフレームサイズ: 1528 [byte]) とした。キャンセル回路の消費電力は 30 [mW] ($P_{cancel,on} = 30$ [mW]) とした。

図 7 (a) に端末数 N を 2 から 45 に変化させた場合のスループットを示す。図 7 (a) から 2 つのことが分かる。1 つ目は、端末数によらず LPFD-PKT が一番高いスループットを示していることである。このことから、端末数によらず送受信のスケジューリングがスループットを向上させていることが分かる。また、LPFD-PKT では端末間干渉の情報を収集して端末間干渉の発生を防いでいるため、RTS/FCTS と比較しても高いスループットを達成したと考えられる。2 つ目は、端末数が増加するにつれて LPFD-PKT と LPHD-PKT のスループットが低下することである。これは、端末数が増加するにつれて LPFD-PKT と LPHD-PKT の制御フレームによるオーバーヘッドが増加するためであると考えられる。

次に、図 7 (b) に端末数 N を 2 から 45 に変化させた場合のエネルギー効率を示す。図 7 (b) から 2 つのことが分かる。1 つ目は、LPFD-PKT が端末数によらず一番高いエネルギー効率を示していることである。特に LPFD-PKT は、LPHD-PKT と比較して最大で約 1.73 倍 ($N = 35$)、HDPSM と比較して最大で約 6.16 倍 ($N = 25$)、RTS/FCTS と比較して最大で約 7.29 倍 ($N = 20$) のエネルギー効率を示している。これは、LPFD-PKT では送受信のスケジューリング



(a) スループット



(b) Bit per Joule

図 7 端末数に対する評価

を行うことで、端末がスリープ状態である時間を長くしている効果の現れである。2 つ目は、端末数が増加するにつれて LPFD-PKT、LPHD-PKT のエネルギー効率が低下することである。これは、端末数が増加するに伴って LPFD-PKT と LPHD-PKT の制御フレームのオーバーヘッドが増加するためだと考えられる。

4.3 キャンセル回路の消費電力に対する評価

キャンセル回路の消費電力が増加するにつれて、無線全二重通信を用いた手法のエネルギー効率は低下すると考えられる。キャンセル回路の消費電力が増加した場合のエネルギー効率に与える影響を確かめるためにキャンセル回路の消費電力 $P_{cancel,on}$ を変化させて評価を行った。端末数は 10 台 ($N = 10$) で、ダウンリンクトラフィックは各端末に対して到着率 20 [frame/sec.] ($\lambda_{down} = 20$ [frame/sec.]) のポアソン過程に従って基地局に発生して、アップリンクトラフィックは到着率 20 [frame/sec.] ($\lambda_{up} = 20$ [frame/sec.]) のポアソン過程に従って、各端末に発生するものとした。発生するトラフィックのペイロードのサイズは全て 1500 [byte] ($\alpha = 0$, データフレームサイズ: 1528 [byte]) とした。

図 8 に、キャンセル回路の消費電力 $P_{cancel,on}$ を 0 [mW] から 2000 [mW] に変化させた場合のエネルギー効率を示す。図 8 から 2 つのことが分かる。1 つ目はキャンセル回路の消費電力 $P_{cancel,on}$ が約 300 [mW] 以上の場合、LPFD-PKT のエネルギー効率が LPHD-PKT のエネルギー効率を下回ることが分かる。このことから、無線全二重通信を利用して無線通信のエネルギー効率を向上する場合、キャンセル回路の消費電力は 300 [mW] 以下にする必要があると考えられる。2 つ目はキャンセル回路の消費電力 $P_{cancel,on}$ が 2000 [mW] になっても、LPFD-PKT のエネルギー効率は HDPSM のエ

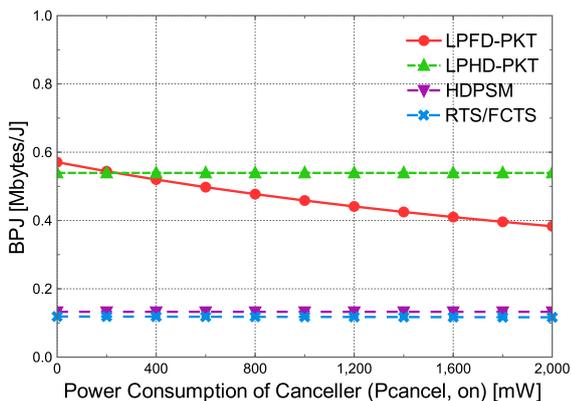


図 8 キャンセル回路の消費電力とエネルギー効率

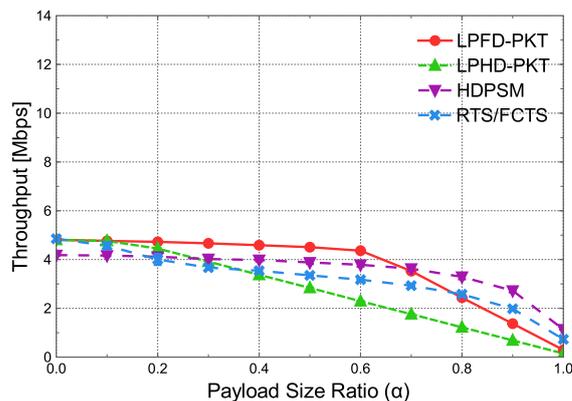
エネルギー効率を上回ることである。HDPSM では、コンテンションにより送受信権を得ていて、各端末は自身に関係する全てのアップリンクとダウンリンクの送受信が終了するまでスリープすることができない。そのため HDPSM では、各端末は自身に関係しない送受信中でもスリープしていない場合がある。一方、LPFD-PKT では送受信のスケジューリングを行うことで、各端末が自身に関係しない送受信中の最中にスリープすることで消費電力を削減することができる。そのため、キャンセル回路の消費電力 $P_{cancel, on}$ が 2000 [mW] になっても、LPFD-PKT のエネルギー効率は HDPSM のエネルギー効率を上回る結果が得られたと考えられる。

4.4 ペイロードのサイズが異なる場合の評価

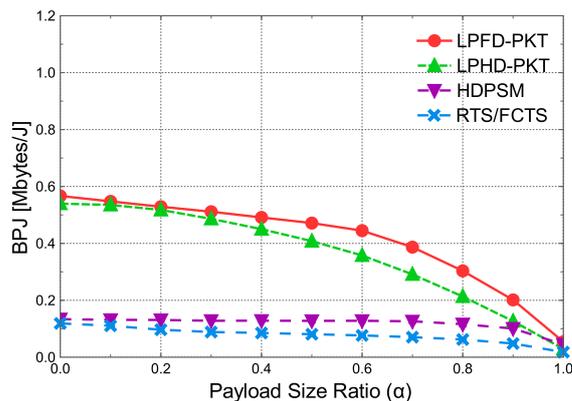
4.2 節及び 4.3 節では、発生するトラフィックのペイロードのサイズが 1500 [byte] で等しい環境において評価を行った。しかしながら、実際にはデータフレームによってペイロードのサイズが異なることが考えられる。データフレームのペイロードサイズが不均一であると、対称全二重通信による消費電力削減効果が低減されると考えられる。さらに、データフレームのペイロードのサイズが小さい場合、オーバーヘッドが大きくなりエネルギー効率が低下すると考えられる。そこで、トラフィック負荷の総量は変更せずに、トラフィックのうち、40 [byte] のペイロード (データフレームサイズ: 68 [byte]) で送信されるトラフィックの割合 α を変更して評価を行った。端末数は 10 台 ($N = 10$) で、ダウンリンクトラフィックは各端末に対して到着率 $\frac{20\{1500(1-\alpha)+40\alpha\}}{1500}$ [frame/sec.] ($\lambda_{down} = \frac{200\{1500(1-\alpha)+40\alpha\}}{1500}$ [frame/sec.]) のポアソン過程に従って基地局に発生して、アップリンクトラフィックは到着率 $\frac{20\{1500(1-\alpha)+40\alpha\}}{1500}$ [frame/sec.] ($\lambda_{up} = \frac{20\{1500(1-\alpha)+40\alpha\}}{1500}$ [frame/sec.]) のポアソン過程に従って、各端末に発生するものとした。また、キャンセル回路の消費電力は 30 [mW] ($P_{cancel, on} = 30$ [mW]) とした。

図 9 (a) に 40 [byte] のペイロードの割合 α を 0 から 1 に変化した場合のスループットを示す。図 9 (a) から全ての方式において、40 [byte] のペイロードの割合 α が増加するにつれてスループットが低下することが分かる。これは、ペイロードのサイズが小さいデータフレームの割合が増えることで各方式におけるオーバーヘッドが大きくなるためだと考えられる。

次に、図 9 (b) に 40 [byte] のペイロードの割合 α を 0 から 1 に変化した場合のエネルギー効率を示す。図 9 (b) から 40 [byte] のペイロードの割合 α が 0.9 以下の場合、LPFD-PKT が一番高いエネルギー効率を示すことが分かる。文献 [16] によると、実際のトラフィックでは 40 [byte] のペイロードの割合 α は約 0.4 となる。そのため、実際のトラフィックにおいて LPFD-PKT は一番高いエネルギー効率を示す。



(a) スループット



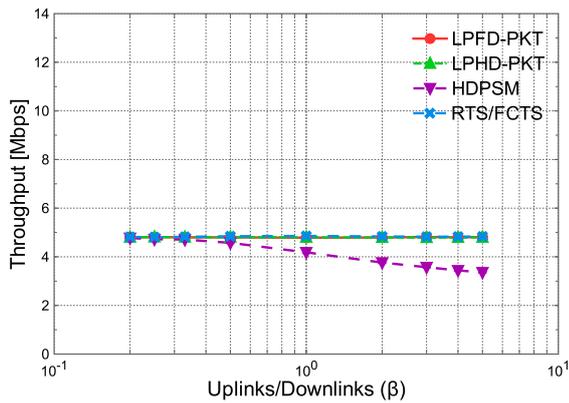
(b) Bit per Joule

図 9 ペイロードのサイズが異なる場合の評価

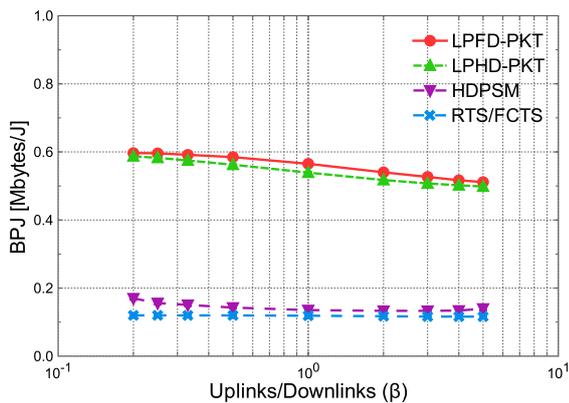
4.5 アップリンクとダウンリンクのトラフィック負荷が異なる場合の評価

4.2 節から 4.4 節では、各端末のアップリンクとダウンリンクのトラフィック負荷が等しい環境で評価を行った。しかしながら、実際にはアップリンクとダウンリンクのトラフィック負荷が異なることで、対称全二重通信が発生しにくくなりエネルギー効率が低下すると考えられる。そこで、アップリンクとダウンリンクのトラフィック負荷の総量は変更せずに、アップリンクとダウンリンクのトラフィック負荷の比 β が異なる環境で評価を行った。アップリンクとダウンリンクのトラフィック負荷の比 β はアップリンクのトラフィック負荷をダウンリンクのトラフィック負荷で割ったものである。端末数は 10 台 ($N = 10$) で、ダウンリンクトラフィックは各端末に対して到着率 $\frac{40}{1+\beta}$ [frame/sec.] ($\lambda_{down} = \frac{40}{1+\beta}$ [frame/sec.]) のポアソン過程に従って基地局に発生して、アップリンクトラフィックは到着率 $\frac{40\beta}{1+\beta}$ [frame/sec.] ($\lambda_{up} = \frac{40\beta}{1+\beta}$ [frame/sec.]) のポアソン過程に従って各端末に発生するものとした。発生するトラフィックのペイロードのサイズは全て 1500 [byte] ($\alpha = 0$, データフレームサイズ: 1528 [byte]) とした。また、キャンセル回路の消費電力は 30 [mW] ($P_{cancel, on} = 30$ [mW]) とした。

図 10 (a) にアップリンクとダウンリンクのトラフィック負荷の比 β を 0.2 から 5 に変化した場合のスループットを示す。図 10 (a) から 2 つのことが分かる。1 つ目は、LPFD-PKT はアップリンクとダウンリンクのトラフィック負荷の比 β に関わらずほぼ一定のスループットを示していることである。このことから、LPFD-PKT ではアップリンクとダウンリンクのトラフィック負荷の比 β によらず適切に通信のスケジューリングがされており、スループットが維持されていると考えられる。2 つ目は、HDPSM がアップリンクとダウンリン



(a) スループット



(b) Bit per Joule

図 10 アップリンクのトラフィック負荷とダウンリンクのトラフィック負荷が異なる場合の評価

アップリンクのトラフィック負荷の比 β が増加するにつれて、スループットが低下することである。HDPSM のアップリンクは通常の CSMA/CA と同様の方法で行っているため、アップリンクのトラフィック負荷が増加するにつれて、スループットが低下したと考えられる。

次に、図 10 (b) にアップリンクとダウンリンクのトラフィック負荷の比 β を 0.2 から 5 に変化させた場合のエネルギー効率を示す。図 10 (b) からアップリンクとダウンリンクのトラフィック負荷の比 β によらず、LPFD-PKT のエネルギー効率が一番高いことが分かる。しかしながら、LPHD-PKT と比較してエネルギー効率の向上量も少ないことも分かる。今回の評価では、LPFD-PKT と LPHD-PKT はほぼ同等のスループットを達成している。この結果から、無線全二重通信によるスループット向上の効果が得られない場合、無線全二重通信によるエネルギー効率向上の効果は少ないと考えられる。

5. おわりに

本稿では、無線全二重通信を用いた低消費電力無線通信手法である LPFD-PKT の性能を評価した。評価の結果、LPFD-PKT は基地局と各端末におけるバッファ状態を用いて送受信のスケジューリングを行うことで、高いエネルギー効率を実現していることが分かった。現在、LPFD-PKT の実機を用いた性能評価を進めている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP16H01718, JP17J02859, 総務省 SCOPE (155007006) の助成を受けたものである。

参考文献

[1] Choi, J. I., Jain, M., Srinivasan, K., Levis, P. and Katti, S.: Achieving Single Channel, Full Duplex Wireless Communi-

cation, *Proceedings of the 16th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom'10)*, Chicago, Illinois, pp. 1–14 (2010).

[2] Everett, E., Sahai, A. and Sabharwal, A.: Passive Self-interference Suppression for Full-duplex Infrastructure Nodes, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 13, No. 2, pp. 680–694 (2014).

[3] Jain, M., Choi, J. I., Kim, T. M., Bharadia, D., Seth, S., Srinivasan, K., Levis, P., Katti, S. and Sinha, P.: Practical, Real-time, Full Duplex Wireless, *Proceedings of the 17th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom'11)*, Las Vegas, Nevada, pp. 301–312 (2011).

[4] Bai, J. and Sabharwal, A.: Distributed Full-duplex via Wireless Side-channels: Bounds and Protocols, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 12, No. 8, pp. 4162–4173 (2013).

[5] Bharadia, D., McMilin, E. and Katti, S.: Full duplex radios, *Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (ACM SIGCOMM'13)*, Hong Kong, China, pp. 375–386 (2013).

[6] Tamaki, K., Sugiyama, Y., Raptino, A., Bandai, M., Saruwatari, S. and Watanabe, T.: Full Duplex Media Access Control for Wireless Multi-hop Networks, *Proceedings of the IEEE 77th Vehicular Technology Conference (IEEE VTC'13-Spring)*, Dresden, Germany, pp. 1–6 (2013).

[7] Choi, W., Lim, H. and Sabharwal, A.: Power-Controlled Medium Access Control Protocol for Full-Duplex WiFi Networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 14, No. 7, pp. 3601–3613 (2015).

[8] Tang, A. and Wang, X.: Medium Access Control for a Wireless LAN with a Full Duplex AP and Half Duplex Stations, *Proceedings of IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM'14)*, Austin, Texas, pp. 4930–4935 (2014).

[9] Cheng, W., Zhang, X. and Zhang, H.: RTS/FCTS Mechanism based Full-duplex MAC Protocol for Wireless Networks, *Proceedings of IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM'13)*, Atlanta, Georgia, pp. 5017–5022 (2013).

[10] Sen, S., Choudhury, R. R. and Nelakuditi, S.: CSMA/CN: Carrier Sense Multiple Access with Collision Notification, *Proceedings of the 16th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom'10)*, Chicago, Illinois, pp. 25–36 (2010).

[11] Zhang, Y., Lazos, L., Chen, K., Hu, B. and Shivaramaiah, S.: FD-MMAC: Combating Multi-Channel Hidden and Exposed Terminals Using a Single Transceiver, *Proceedings of the 33rd Annual IEEE International Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM'14)*, Toronto, Canada, pp. 2742–2750 (2014).

[12] Vermeulen, T. and Pollin, S.: Energy-delay Analysis of Full Duplex Wireless Communication for Sensor Networks, *Proceedings of IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM'14)*, Austin, Texas, pp. 455–460 (2014).

[13] Murakami, R., Kobayashi, M., Saruwatari, S. and Watanabe, T.: An Energy Efficient MAC for Wireless Full Duplex Networks, *Proceedings of IEEE Globecom Workshops (IEEE GC Wksp'16)*, Washington, D.C., pp. 1–6 (2016).

[14] IEEE: IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks–Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, *IEEE Std 802.11-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007)*, pp. 1–5229 (2012).

[15] Kobayashi, M., Murakami, R., Saruwatari, S. and Watanabe, T.: Wireless Full-duplex Medium Access Control for Enhancing Energy Efficiency, *arXiv preprint arXiv:1704.00058 [cs.NI]*, pp. 1–30 (online), available from (<https://arxiv.org/abs/1704.00058>) (2017).

[16] Sinha, R., Papadopoulos, C. and Heidemann, J.: Internet packet size distributions: Some observations, *USC/Information Sciences Institute, Tech. Rep. ISI-TR-2007-643* (2007).

[17] Silix Technology: 802.11 a/b/g SDIO Card Module Ultracompact Wireless Solution for Embedded Applications, available from (<http://www.mouser.com/ds/2/367/sx-sdcag-brief-2825.pdf>) (accessed 2016/3/3).