

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 プロトコルの検討

村上 遼¹ 小林 真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は、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、無線全二重通信が大容量化のみならず、高いエネルギー効率を提供できることを示す。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に着目した無線全二重通信向けの省電力モード「LPFD (Low Power communication by wireless Full-Duplexing)」を提案する。LPFD では無線通信端末に具備されたトランシーバの電源を切るスリープ状態を用いることで、無線通信端末の消費電力を削減して無線全二重通信におけるエネルギー効率を向上する。計算機シミュレーションの結果、LPFD は既存の無線全二重通信の MAC プロトコルと比較して最大約 90.8 倍、無線半二重通信の PSM (Power Saving Mode) と比較しても最大で約 2.98 倍の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 があった場合、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った。

それに対して本稿では、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する。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、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「LPFD-PKT (Low Power communication by wireless Full Duplexing with PacKeT)」と「LPFD-FBM ((Low Power communication by wireless Full Duplexing with Frequency Bit Map)」を提案する。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する。LPFD-FBM では、周波数ビットマップを用いることで LPFD-PKT のオーバーヘッドを削減する。シミュレーションによる評価の結果、LPFD-FBM が既存の無線全二重通信の MAC プロトコルに比べて約 90.8 倍、無線半二重通信の PSM に比べて最大で約 2.98 倍のエネルギー効率を得られることが確認できた。

LPFD-FBM で用いる周波数ビットマップは、文献 [15] における Back2F を拡張したものである。文献 [15] では、ランダムバックオフの期間を OFDM 信号のサブキャリアで表して他端末と同時に交換することでランダムバックオフ時間の削減に成功している。Back2F における基地局と端末は送信回路と受信回路を同時に動かすことを前提としているため、どの端末が最も短いランダムバックオフを持っているかを瞬時に交換することができる。Back2F がサブキャリアでランダムバックオフの期間を表現していたのに対して、筆者らが提案する周波数ビットマップでは、バッファ情報の収集、端末間干渉の計測と収集、確認応答など多様な用途で利用している点が特徴である。

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 節で提案手法としてパケットを用いて情報交換を行う LPFD-PKT、4 節で LPFD-PKT のオーバーヘッドを削減するために周波数ビットマップを用いる LPFD-FBM についてそれぞれ述べる。5 節でシミュレーションによる LPFD-PKT と LPFD-FBM の評価を示し、最後に 6 節でまとめとする。

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科

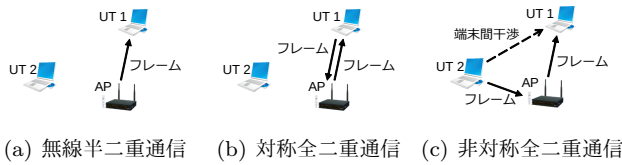


図 1 対象とする無線ネットワーク

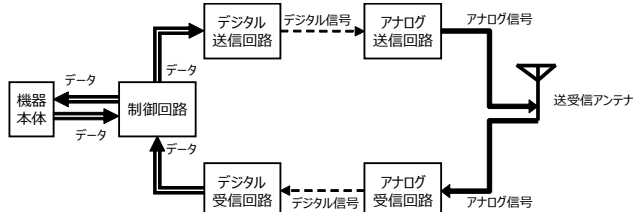


図 2 無線半二重通信のトランシーバ回路

表 1 無線半二重通信端末状態と回路の駆動状態との関係

無線回路の状態	制御回路	送信回路	受信回路
スリープ	OFF	OFF	OFF
送信	ON	ON	OFF
受信	ON	OFF	ON

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 (AP) と N 台の端末 (UT) 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 $P_{\text{control,on}}$ [mW], OFF の時は $P_{\text{control,off}}$ [mW] の電力を消費する。

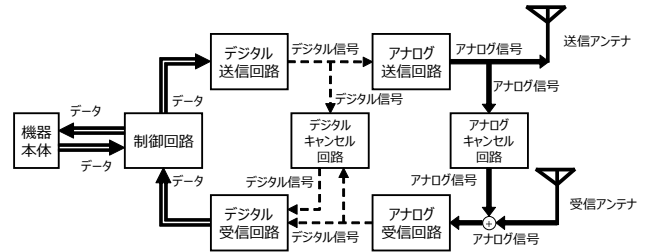


図 3 無線全二重通信のトランシーバ回路

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 $P_{\text{tx,on}}$ [mW], OFF の時は $P_{\text{tx,off}}$ [mW] の電力を消費する。

デジタル受信回路は復調を行う回路である。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。本稿では, デジタル受信回路とアナログ受信回路をまとめて受信回路と呼ぶ。受信回路が ON の時 $P_{\text{rx,on}}$ [mW], OFF の時は $P_{\text{rx,off}}$ [mW] の電力を消費する。

表 1 に無線半二重通信端末状態と各回路の駆動状態の関係を示す。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 $f_{\text{hd}}(s)$ [W] とすると, 各状態の消費電力は,

$$f_{\text{hd}}(\text{sleep}) = P_{\text{control,off}} + P_{\text{tx,off}} + P_{\text{rx,off}}$$

$$f_{\text{hd}}(\text{tx}) = P_{\text{control,on}} + P_{\text{tx,on}} + P_{\text{rx,off}}$$

$$f_{\text{hd}}(\text{rx}) = P_{\text{control,on}} + P_{\text{tx,off}} + P_{\text{rx,on}}$$

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 $P_{\text{cancel,on}}$ [mW], OFF の時は $P_{\text{cancel,off}}$ [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。

表 2 に無線全二重通信における無線全二重通信端末の状態と各回路の駆動状態の関係を示す。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

表 2 無線全二重通信端末状態と回路の駆動状態との関係

無線回路の状態	制御回路	送信回路	受信回路	キャンセル回路
スリープ	OFF	OFF	OFF	OFF
送信	ON	ON	OFF	OFF
受信	ON	OFF	ON	OFF
全二重通信	ON	ON	ON	ON

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、

$$f_{fd}(\text{sleep}) = P_{\text{control,off}} + P_{\text{tx,off}} + P_{\text{rx,off}} + P_{\text{cancel,off}}$$

$$f_{fd}(\text{tx}) = P_{\text{control,on}} + P_{\text{tx,on}} + P_{\text{rx,off}} + P_{\text{cancel,off}}$$

$$f_{fd}(\text{rx}) = P_{\text{control,on}} + P_{\text{tx,off}} + P_{\text{rx,on}} + P_{\text{cancel,off}}$$

$$f_{fd}(\text{fd}) = P_{\text{control,on}} + P_{\text{tx,on}} + P_{\text{rx,on}} + P_{\text{cancel,on}}$$

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、 $S = \{\text{sleep}, \text{tx}, \text{rx}, \text{fd}\}$ を全ての状態、 t_s 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。

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

α ($1 \leq \alpha \leq 2$) を無線全二重通信のキャンセル効率を表す変数、 C は物理層の容量 [bps] 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。

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

理想的な自己干渉除去が行われている時、 $\alpha = 2$ となって、無線半二重通信の 2 倍の容量を達成していることを示す。 $\alpha = 1$ の時は、キャンセル効率が低いために、無線半二重通信と同程度の性能しか出ていないことを意味する。

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 の値 BPJ [bits/J] は以下の式で表される。

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

3. 提案手法: 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無線通信を実現する LPFD-PKT (Low Power communication by wireless Full-Duplexing with PacKeTs) を設計した。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する。

3.1 各通信方式のエネルギー効率

LPFD-PKT の設計の着眼点は、対称全二重通信、非対称全二重通信、無線半二重通信の中では対称全二重通信が最もエネルギー効率が低い点である。BPJ_{sfd}, BPJ_{afd}, BPJ_{hd} を、それぞれ対称全二重

通信、非対称全二重通信、無線半二重通信の BPJ とする。また、基地局と端末それぞれが $C\tau$ [bits] のデータを送受信、 C [bps] は物理層の容量、 $P_{s,\text{off}} = 0$ [mW]、自己干渉除去は理想的に行えるものとする。

対称全二重通信では、時間 τ の間に、基地局と端末が $C\tau$ [bits] のデータを送信する。時間 τ の間、端末は全二重通信に必要な電力を消費する。すなわち、対称全二重通信の BPJ は、

$$\begin{aligned} \text{BPJ}_{\text{sfd}} &= \frac{2 \times C\tau}{f_{fd}(\text{fd})\tau} \\ &= \frac{2C}{P_{\text{control,on}} + P_{\text{tx,on}} + P_{\text{rx,on}} + P_{\text{cancel,on}}} \end{aligned} \quad (1)$$

となる。

非対称全二重通信でも、同様に時間 τ の間に、基地局と端末が $C\tau$ [bits] のデータを送信する。時間 τ の間、1 つの端末は送信に必要な電力を消費して、もう 1 つの端末は受信に必要な電力を消費する。すなわち、非対称全二重通信の BPJ は、

$$\begin{aligned} \text{BPJ}_{\text{afd}} &= \frac{C\tau + C\tau}{f_{fd}(\text{tx})\tau + f_{fd}(\text{rx})\tau} \\ &= \frac{2C}{2P_{\text{control,on}} + P_{\text{tx,on}} + P_{\text{rx,on}}} \end{aligned} \quad (2)$$

となる。

無線半二重通信では、時間 2τ 間に時分割で、基地局と端末がそれぞれ $C\tau$ [bits] のデータを送信する。時間 2τ のうち、時間 τ 間毎に、端末は送信と受信に必要な電力を消費する。すなわち、無線半二重通信の BPJ は、

$$\begin{aligned} \text{BPJ}_{\text{hd}} &= \frac{C \times 2\tau}{f_{fd}(\text{tx})\tau + f_{fd}(\text{rx})\tau} \\ &= \frac{2C}{2P_{\text{control,on}} + P_{\text{tx,on}} + P_{\text{rx,on}}} \end{aligned} \quad (3)$$

となる。

式 (2)、式 (3) より、 $\text{BPJ}_{\text{afd}} = \text{BPJ}_{\text{hd}}$ となる。式 (1)、式 (2) より、 $P_{\text{control,on}} > P_{\text{cancel,on}}$ という条件下では、 $\text{BPJ}_{\text{sfd}} > \text{BPJ}_{\text{afd}}$ となる。一般に、 $P_{\text{control,on}} > P_{\text{cancel,on}}$ が成り立つため、以下の式が得られる。

$$\text{BPJ}_{\text{sfd}} > \text{BPJ}_{\text{afd}} = \text{BPJ}_{\text{hd}} \quad (4)$$

3.2 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を行う。

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 が基地局宛のデータフレームを 1 つ、端末 3 が基地局宛のデータフレームを 2 つバッファしていると仮定している。

「(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 3.3 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 3.4 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 3.5 節で述べる。

3.3 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、3.4 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 は基地局宛のデータフレームを 2 つ、端末 3 は基地局宛のデータフレームを 1 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。

3.4 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。式 (4) の結果を受けて、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 2 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 3.3 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 2 と端末 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 2 と端末 4 は、端末 2、端末 4 の順に UII フレームを送信する。端末 2 は端末 1、端末 3 と端末間干渉が発生することを通知する。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 1 と端末 3 に 1 つず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 2 と端末 4 宛のデータフレームが 1 つずつバッファされている。基地局は端末間干渉が発生しないように、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 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。

最後に、対称全二重通信や非対称全二重通信の対象とならなかったデータフレームに対して無線半二重通信のスケジューリングを行う。図 4 の例では、3 サイクル目として端末 1 から基地局宛のアップリンク、4 サイクル目として基地局から端末 2 宛のダウンリンクをスケジューリングする。

3.5 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、3 サイクル目はアップリンク送信元が端末 1 の無線半二重通信、4 サイクル目はダウンリンク宛先が端末 2 の無線半二重通信となる。各端末と基地局は SCHED フレームで通知された送信順でデータフレームと ACK (ACKnowledge) フレームを送受信する。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。

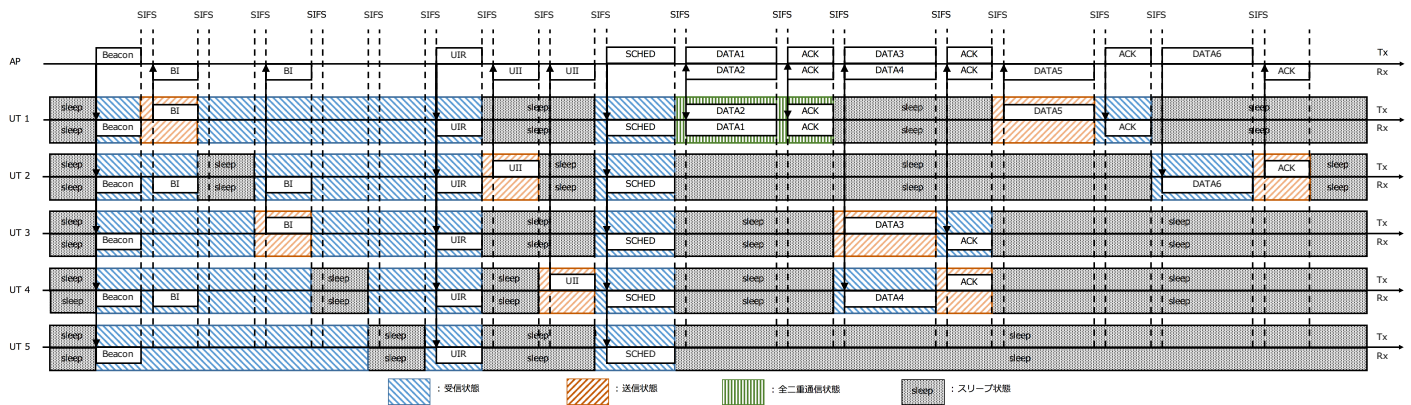


図 4 LPFD-PKT: 動作例

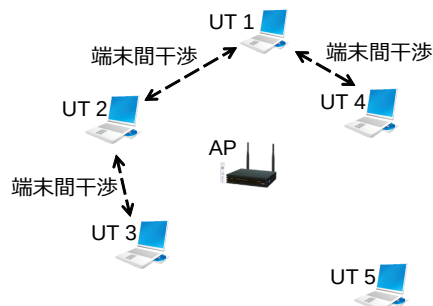


図 5 基地局 1 台と端末 5 台の無線ネットワーク

4. 提案手法: LPFD-FBM

3 節に示した LPFD-PKT では、端末のパッファ状態の収集、端末間干渉情報の収集、到達確認がオーバーヘッドとなる。特に端末数が多い場合には、端末間干渉情報を収集するためのフレームの数が指数関数的に増大する。それに対して、LPFD-FBM (Low Power communication by wireless Full-Duplexing with Frequency Bit Map) では、周波数ビットマップと全二重通信を組み合わせて端末の情報を収集することでオーバーヘッドを削減する。具体的には、端末のパッファ状態収集のオーバーヘッドを削減する BI-FBM (Buffer Information-Frequency Bit Map), 端末間干渉情報通知のオーバーヘッドを削減する UIR-FBM (User Interference Request-Frequency Bit Map) と UII-FBM (User Interference Information-Frequency Bit Map), 各端末が送受信するスケジュールを通知するオーバーヘッドを削減する SCHED-FBM (SCHEDULE-Frequency Bit Map), 確認応答のオーバーヘッドを削減する ACK-FBM (ACKnowledgement-Frequency Bit Map) の 5 種類の周波数ビットマップを用いる。

4.1 周波数ビットマップ

周波数ビットマップとは、OFDM 信号のサブキャリアの有無と無線全二重通信を組み合わせることで、複数端末が同時かつ双方向に情報を伝達することができる技術である。図 6 に周波数ビットマップの例を示す。周波数ビットマップは周波数方向の成分と時間方向の成分から構成される。周波数方向の成分は OFDM 信号のサブキャリアに対応している。時間方向の成分は OFDM 信号のシンボルに対応している。1 つのシンボル上の 1 つのサブキャリアが 1 ビットに相当する。各端末が端末 1, 端末 2, ..., 端末 N のどの ID に対応するかは端末が基地局にアソシエーションした時に基地局から割り当てられる。

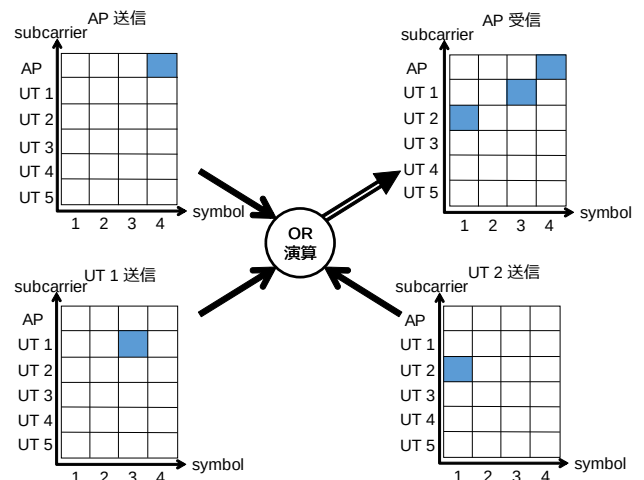


図 6 周波数ビットマップ

複数端末が同時に周波数ビットマップを OFDM 信号として送信すると、各端末の周波数ビットマップが空間上で OR 演算される。このような周波数ビットマップの特性を用いることで、多数の端末から同時に情報を受け取ることができる。さらに、無線全二重通信では送信回路と受信回路を同時に利用することができるため、多数の端末が同時かつ双方向に情報を共有することもできる。

4.2 LPFD-FBM の動作

図 7 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での LPFD-FBM のタイムシーケンスの例を示す。図 7 の例では、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 が基地局宛のデータフレームを 1 つ、端末 3 が基地局宛のデータフレームを 2 つパッファしているとする。

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へ移行して基地局からのビーコンフレームを受信する。ビーコンフレームは 3 節に示した LPFD-PKT と同じものを用いる。

ビーコンを受け取った全ての端末は BI-FBM を用いて端末のパッファ状態を基地局に通知する。また、全ての端末は、BI-FBM を送信すると同時に無線全二重通信の受信回路で BI-FBM を受信して端末間干渉情報を測定する。BI-FBM の詳細は 4.3 節で述べる。

BI-FBM を受け取った基地局は、対称全二重通信のスケジューリングを行う。対称全二重通信のスケジューリング後、基地局は UIR-FBM を用いて非対称全二重通信でのダウンリンクの宛先候補

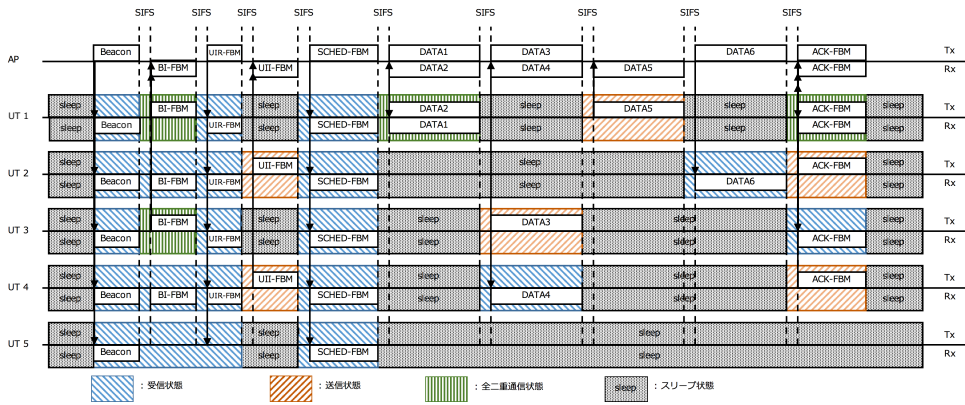


図 7 LPFD-FBM: 動作例

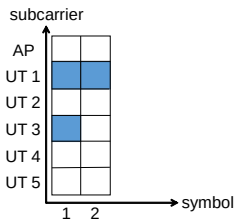


図 10 UII-FBM

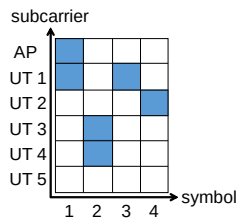


図 11 SCHED-FBM

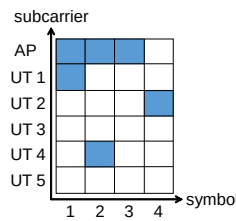


図 12 ACK-FBM

を全端末に対して通知する。UIR-FBMを受信した端末は、基地局に対するデータフレームを保持している端末と自端末の端末間干渉の情報をUII-FBMを用いて基地局に送信する。UIR-FBMの詳細は4.4節で、UII-FBMの詳細は4.5節で述べる。

UII-FBMを受信した基地局は自分がバッファしているデータフレームの情報、各端末がバッファしているデータフレームの情報、端末間干渉の情報を用いてデータフレームの送受信をスケジューリングする。スケジューリングのアルゴリズムはLPFD-PKTと同じものを用いる。基地局は決定したスケジュールをSCHED-FBMを用いて全端末に送信する。SCHED-FBMの詳細は4.6節で述べる。

SCHED-FBMを受け取った端末は、基地局が決定したスケジュールに合わせてデータフレームの送受信を行う。全てのデータフレームの送受信が終了した後に、基地局と端末はACK-FBMを用いてデータフレームが到達したかどうかの情報を交換する。ACK-FBMの詳細は4.7で述べる。

4.3 BI-FBM

BI-FBMは端末のバッファ状態収集に用いる周波数ビットマップである。LPFD-PKTのBIフレームと置き換える。図8にBI-FBMの例を示す。各サブキャリアが端末ID、各シンボルがバッファしている数を表している。データフレームをバッファしている端末はその数だけ自身に割り当てられたサブキャリア上でシンボルを送信する。バッファする数の最大値である L_{max} は端末が基地局にアソシエーションした時に基地局から通知される。端末が L_{max} 個以上の基地局宛のデータフレームをバッファしている場合は、その端末は L_{max} をBI-FBMに入れて通知する。図8の例では、端末1が2つ、端末3が1つ基地局宛のデータフレームを保持している。

BI-FBMは、LPFD-PKTにおけるBIフレームと同様に端末間干渉の測定にも利用される。BI-FBMを受信した端末は、BI-FBMに他の端末がバッファしているという情報が含まれていた場合には、その端末と端末間干渉が発生すると判断する。ある端末がバッファしている数の情報を受信しなかった端末はその端末間では干渉が発生しないと判定する。

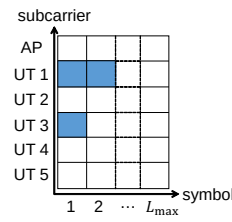


図 8 BI-FBM

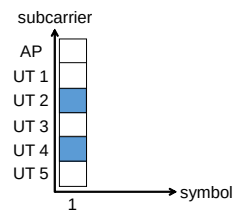


図 9 UIR-FBM

端末Aがバッファにフレームを保持している場合でも、端末Aと端末Bが隠れ端末の関係にあることで、端末Aが設定した1が減衰によって端末Bに届かない場合が発生する。このように減衰によって端末Aが設定した1を端末Bが0と判定した場合でも、端末Aと端末B間では端末間干渉が発生しない。端末Aがデータフレームを送信したとしても減衰によって端末Bには届かないからである。

4.4 UIR-FBM

UIR-FBMは、基地局が端末に対して端末間干渉情報をリクエストするのに使用する周波数ビットマップである。LPFD-PKTにおけるUIRフレームのオーバーヘッドを削減する。

図9にUIR-FBMの例を示す。UIR-FBMは1シンボルで構成される。基地局は、BI-FBMを用いて収集した情報を元に、非対称全二重通信のダウンリンクの候補となる端末に対応するサブキャリアに1を設定する。図9の例では、端末2と端末4に対応する部分に1が設定されている。

4.5 UII-FBM

UII-FBMは各端末から基地局に対して端末間干渉情報を送信する際に用いる周波数ビットマップである。LPFD-PKTにおけるUIIフレームのオーバーヘッドを削減する。

図10にUII-FBMの例を示す。基地局から送信されたUIR-FBMを受信した端末は、1が設定されている端末と端末間干渉が発生する場合に端末間干渉情報を基地局に対して送信する。各端末は、UII-FBMのサイズを縮小するために以下の手順で端末間干渉情報を送信する。まず、基地局から送信されたUIR-FBMを受信した端末は、ビットに1が設定されている端末の部分だけ取り出して端末IDが小さい順に並べる。整列された端末IDの順序がシンボルに相当する。UIR-FBMで端末間干渉情報の通知を要求された端末は、自身の端末IDに一致するシンボルにおいてUII-FBMを送信する。UII-FBMでは、自身と干渉が発生する端末IDと対応するサブキャリアに1を設定する。

図10の例では、端末2と端末4の干渉情報を収集している。端末2に対応するシンボルでは、端末2が端末間干渉の発生する端末1と端末3に対応するサブキャリアに1を設定して1シンボルを送信している。端末4に対応するシンボルでは、端末4が端末間干渉の発生する端末1に対応するサブキャリアに1を設定して1シンボルを送信している。

4.6 SCHED-FBM

SCHED-FBMは基地局が全端末に対してデータフレーム送受信

のスケジュールを通知するための周波数ビットマップである。図 11 に SCHED-FBM の例を示す。サブキャリアが各端末の ID、シンボルが送信するタイミングを意味している。対称全二重通信を用いてデータフレームを送受信する場合、基地局は基地局と通信相手の端末に割り当てられた周波数成分上に信号を送信する。非対称全二重通信を用いてデータフレームを送受信する場合、基地局はアップリンクの送信元端末とダウンリンクの宛先端末にそれぞれ対応する 2 か所のビットに 1 を設定する。無線半二重通信を用いてデータフレームを送受信する場合、基地局は通信をする端末に該当するビットのみを 1 に設定する。図 11 の例では、1 サイクル目では基地局と端末 1 との対称全二重通信、2 サイクル目では端末 3 からのアップリンクと端末 4 へのダウンリンクの非対称全二重通信、3 サイクル目では端末 1 からのアップリンクの無線半二重通信、4 サイクル目では端末 2 へのダウンリンクの無線半二重通信を行うことを意味している。

周波数ビットマップを用いた非対称全二重通信及び無線半二重通信のスケジュールの通知では、アップリンクとダウンリンクを区別する必要はないことに注意されたい。UIR-FBM で割り当てられたサブキャリアに 1 が設定されていた端末が非対称全二重通信時及び無線半二重通信時のダウンリンクとなると判定できるからである。1 つの端末におけるアップリンクとダウンリンクのデータフレームが存在した場合には対称全二重通信になるため、UIR-FBM と SCHED-FBM だけで非対称全二重通信及び無線半二重通信のスケジュールを通知することができる。

4.7 ACK-FBM

図 12 に ACK-FBM の例を示す。ACK-FBM は確認応答に用いる周波数ビットマップである。サブキャリアが基地局や各端末の ID、シンボルがデータフレームを受信したサイクルを意味している。基地局と端末はデータフレームを受信したサイクルに自分の ID に対応するビットに 1 を設定して ACK-FBM を一斉に送信する。図 12 の例では、1 シンボル目に基地局が端末 1 からのアップリンクに対する ACK、端末 1 が基地局からのダウンリンクに対する ACK を、2 シンボル目には基地局が端末 3 からのアップリンクに対する ACK、端末 4 が基地局からのダウンリンクに対する ACK を、3 シンボル目に基地局が端末 1 からのアップリンクに対する ACK、4 シンボル目に端末 2 が基地局からのダウンリンクに対する ACK を送信している。

5. 評価

LPFD-PKT, LPFD-FBM 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。

5.1 評価環境

性能評価では、1 台の基地局に 3 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奥行き 5 [m] の範囲内に全てランダムに設置して、端末と他の端末との距離が 5 [m] 以内の場合、干渉が発生するものとした。基地局は 3λ [frame/sec.] の間隔で、各端末は λ [frame/sec.] の間隔でポアソン過程に従ってトラヒックが到着するものとした。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する。無線全二重通信では、理想的な自己干渉除去が可能で、自己干渉による伝送レートの低下は無いものとする。LPFD-FBM における各端末の最大バッファ通知数 $L_{\max} = 40$ とした。

各フレームのサイズは IEEE 802.11 標準に基いて定義した [14]。データフレームのサイズは 1528 [byte]、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ルする場合の SCHED フレームのサイズを $20 + 6n_{\text{scheduled}}$ [byte] とした。LPFD-FBM で用いる周波数ビットマップのシンボル長は 1 つあたり 4 [$\mu\text{sec.}$] とした [14]。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) に基いて定義した [16]。 $P_{\text{control,on}} = 4.95 \times 10^1$ [mW], $P_{\text{tx,on}} = 7.76 \times 10^2$ [mW], $P_{\text{rx,on}} = 4.46 \times 10^2$ [mW], $P_{\text{control,off}} = 2.00$ [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。本稿では簡単のため、 $P_{\text{cancel,on}} = 0.00$ [mW] とした。

評価では、以下の 5 方式を比較した。

- (1) LPFD-PKT
3 節で提案した方式である。
- (2) LPFD-FBM
4.2 節で提案した方式である。周波数ビットマップを用いることで LPFD-PKT におけるフレーム交換のオーバーヘッドを削減している。
- (3) FDAM (Full Duplex continuous Active Mode)
通常的全二重通信の通常動作モードである。文献 [3] の MAC プロトコルを想定している。基地局、端末ともにデータフレームの送信要求が到着した際に CSMA/CA でデータフレームの送信を開始する。対称全二重通信は行いが、非対称全二重通信は行わない。FDAM 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) 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。
- (5) upper bound
無線全二重通信を用いたときの理論限界である。

5.2 スループットの評価

提案手法の基本性能を評価することを目的として、トラヒックに対するスループットの評価を行った。図 13 に評価結果を示す。図 13 より、以下の 2 つのことが分かる。1 つ目は、提案手法である LPFD-PKT, LPFD-FBM 共に理論限界に漸近する性能を達成していることである。提案手法における省電力スケジューリングがトラヒックに応じてスケジューリングできているからであると考えられる。2 つ目は、LPFD-PKT, LPFD-FBM ともに無線半二重通信の PSM (HDPSM) よりも最大で約 2.00 倍以上 ($\lambda = 200$ [frame/sec.]) のスループットを達成していることである。無線全二重通信によって通信効率が悪化しているからだと考えられる。

5.3 1 ビット伝送あたりのエネルギー効率の評価

提案手法のエネルギー効率を評価することを目的として、トラヒックに対する 1 ビット伝送あたりのエネルギー効率の評価を行った。1 ビット伝送あたりのエネルギー効率は 2.4 節に示した BPJ を用いた。図 14 に評価結果を示す。図 14 より、以下の 3 つのことが分かる。1 つ目は、提案手法である LPFD-PKT, LPFD-FBM 共に理論限界に

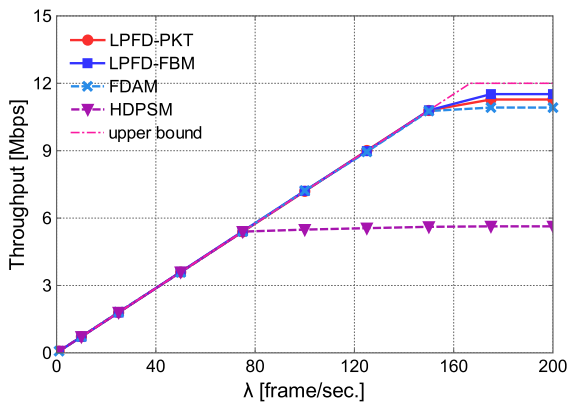


図 13 トラフィックに対するスループット

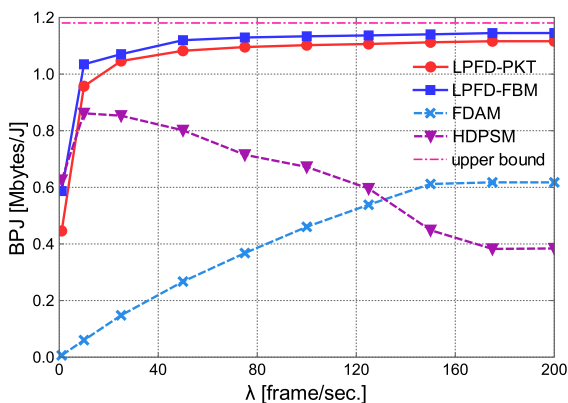


図 14 トラフィックに対するエネルギー効率

漸近する性能を達成していることである。特に LPFD-FBM は無線半二重通信の PSM に対して最大で約 2.98 倍 ($\lambda = 200$ [frame/sec.]), 通常の無線全二重通信に対して最大で約 90.8 倍 ($\lambda = 1$ [frame/sec.]) のエネルギー効率を達成している。2 つ目は, LPFD-FBM が LPFD-PKT よりも性能が高いことである。周波数ビットマップによってオーバーヘッドが削減できているからだと考えられる。3 つ目は, 無線半二重通信の PSM はトラフィックが増加するに従ってエネルギー効率が低下することである。無線半二重通信の PSM では, コンテンションで送信権, 受信権を獲得するからだと考えられる。各端末は自身が関係する全てのアップリンクとダウンリンクの通信が完了するまでスリープすることができない。

6. 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, LPFD-FBM を提案した。LPFD-PKT, LPFD-FBM 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た。また, LPFD-FBM では周波数ビットマップを用いて各端末のバッファ情報と端末間干渉情報収集のオーバーヘッドを削減することで更なる消費電力削減を実現した。評価の結果, LPFD-PKT, LPFD-FBM ともに無線半二重通信の PSM, 既存の無線全二重通信の MAC プロトコルより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, 本稿で提案した LPFD-PKT, LPFD-FBM 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 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 Communication, *Proceedings of the 16th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'10)*, Chicago, IL, 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 (MobiCom'11)*, Las Vegas, NV, 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., McMillin, E. and Katti, S.: Full duplex radios, *Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM'13)*, HongKong, 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 (VTC'13-Spring)*, Dresden, German, 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, TX, 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, GA, 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 (MobiCom'10)*, Chicago, IL, 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)*, Toronto, Canada, 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 Global Communications Conference Workshop (IEEE GLOBECOM'16 Workshop)*, Washington, D.C., pp. 1–6.
- [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 - Redline, *IEEE Std 802.11-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007) - Redline*, pp. 1–5229 (2012).
- [15] Sen, S., Roy Choudhury, R. and Nelakuditi, S.: No Time to Countdown: Migrating Backoff to the Frequency Domain, *Proceedings of the 17th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom'11)*, Las Vegas, NV, p. 241–253 (online).
- [16] 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).