

目次

1. はじめに	1
2. 無線 LAN 通信モデル	2
2.1. CSMA/CA 方式	
2.1.1. IFS による優先制御	
2.2. フレーム構成モデル化	
3. 実装とシミュレーション設定	5
3.1. User クラスの設計	
3.2. シミュレーション条件	
4. 評価	6
5. まとめ	7
参考文献	8

1. はじめに

近年、無線通信端末の利用者が急増し、多様な場所で無線通信システムが活用されており今後も利用の拡大と機能の高度化が見込まれる。一方で、無線通信技術の進歩に伴いシステム自体はますます高機能化・複雑化している。

しかし、研究開発の現場では各レイヤごとに検討が行われており、単一レイヤのみの評価では通信システム全体の性能を十分に把握することができない。

本研究では、無線通信全体の品質を総合的に評価するために、実環境の電波伝搬特性を考慮した物理層と MAC(Medium Access Control) 層が連携したシミュレータの開発の一環として、IEEE 802.11 規格に基づく CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance、衝突回避機能付きキャリア感知多重アクセス) 方式を用いた MAC 層の動作に則った無線 LAN(Local Area Network) モデルを開発し、その精度を評価することを目指す。

2. 無線 LAN 通信モデル

2.1. CSMA/CA 方式

IEEE 802.11 無線 LAN(802.11 無線 LAN) では、同一の無線チャネルを複数端末で共有するためのアクセス制御機能が実装されている。

802.11 無線 LAN では、アクセス制御方式として CSMA/CA が採用されている。802.11 無線 LAN の基本アクセス手順とされている自律分散制御 (DCF : Distributed Coordination Function) では、各局がチャネルの使用状況を検査して自律的にパケット (フレーム) の送信タイミングを決定するが、その時のアクセス制御プロトコルとして CSMA/CA を使用している。

このため、たとえ周辺に同一チャネルを利用する無線セルが存在したとしても CSMA/CA により、無線セル間で同一チャネルを共有して通信できる。ただし、CSMA/CA では、偶然同時にフレームを送信してしまう可能性、すなわちフレーム同士が無線上で衝突してしまう可能性がある。衝突によって、フレームが正常に受信されなかった場合、パケットは再送されるが衝突の発生する確率は無線局数と通信トラフィック (通信情報量) の増加につれて大きくなり、スループット (データの転送能力) の低下を招く。

CSMA/CA では、フレームの送信を試みようとするそれぞれの無線局が事前にキャリアセンス (CS : Carrier Sense) を行い無線チャネルの使用状況を確認し、他の無線局による送信が行われている間、送信を見合わせる (送信待機) ことによって、衝突をできるだけ回避する。

フレームを送信していない無線局は、電波を送信していないため、Carrier(搬送波) の使用状況を Sense(検出) し、一定時間未使用 (Idle) であれば、Carrier を誰も使用していないと判断し、送信を開始する。無線チャネルが使用中 (Busy) であれば、Idle 状態になるまで待機する。

2.2. 2 進数バックオフ方式

IEEE 802.11 規格では、CSMA/CA と呼ばれるアクセス制御方式を採用している。図 1 に CSMA/CA の概要を示す。CSMA/CA では、送信したいフレームが発生した際、まずキャリアセンス (CS) を行い、チャネルが空いている (Idle) かどうかを確認する。チャネルが Idle の場合は、各端末がバックオフ時間としてランダムなスロット数を生成し、その時間だけ待った後に再度キャリアセンスを行い、チャネルが Idle ののであればフレームを送信し、使用中 (Busy) だった場合はフレームを送信できるまでバックオフ時間を待ち越す。複数の端末が同じスロット数となった場合には送信タイミングが同時になり、衝突が発生するため再送制御が必要となる。

無線 LAN システムでは 2 進数バックオフ方式を採用している。バックオフ制御に用いる Contention Window(CW) は、最小値を 15 とし、最大値の上限を 1023 スロットとして衝突回数の増加に従い CW サイズは、再送回数を n とすると、CW サイズの最大値 CW_{\max} とスロット数 s は

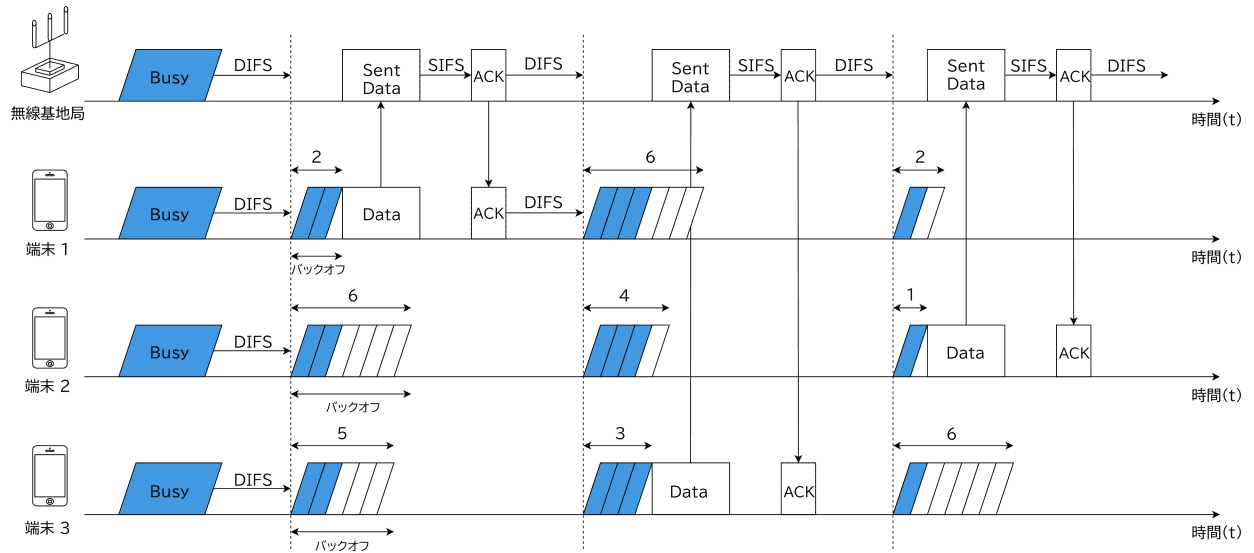
$$CW_{\max} = 2^{4+n} - 1 \quad (1)$$

$$s = \text{randint}(1, \min(c_{\max}, 1023)) \quad (2)$$

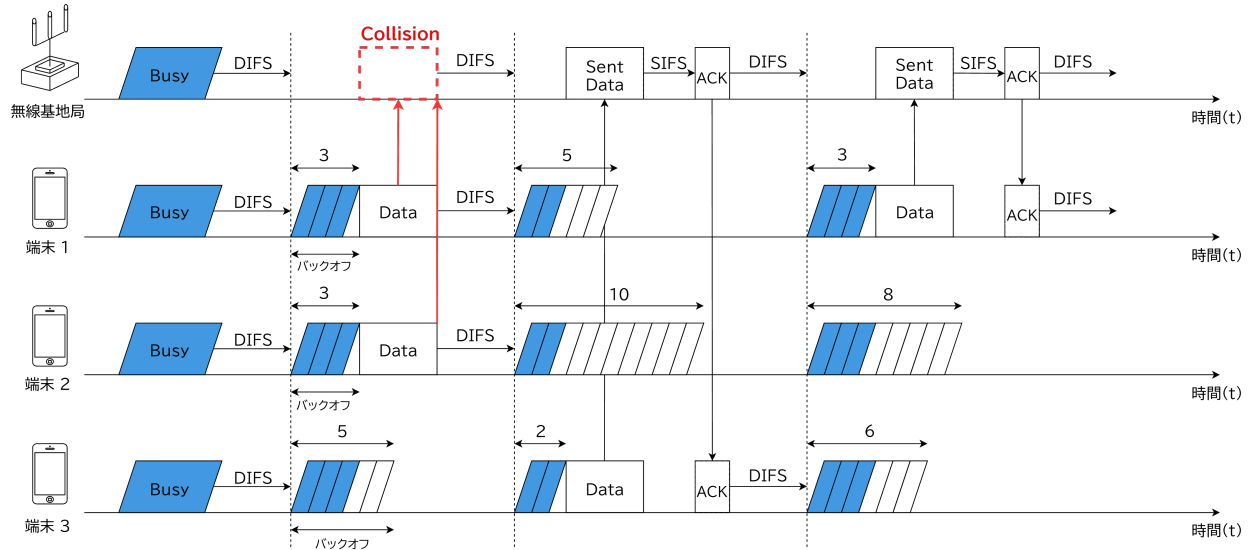
で求められる。

衝突が発生するたびに CW サイズの最大値は 2 倍に増加するため、再送回数が増えるほどバックオフ時間が長くなることで他端末と同じ CW サイズを生成することがなくなり、衝突確率を低減することができる。一方で、2 進数バックオフ方式では CW サイズの増加がオーバーヘッドを引き起こし、スループットの低下につながる。

本シミュレータでは、端末単位でスロット数と再送回数 n を保持することで、各端末が送信を試みる際の待機時間を動的に設定する処理を実装した。



(a) CSMA/CA 成功例



(b) CSMA/CA 失敗例

図 1: CSMA/CA の概要

2.2.1. IFS による優先制御

フレーム間には IFS(Inter Frame Space) と呼ばれる待機時間が設定されている。IFS の長さは 6 種類存在し、代表的なものに DIFS(Distributed Inter Frame Space) と SIFS(Short Inter Frame Space) がある。これらは、フレームの優先順位に基づいてどの IFS を選択するかが決定される。

DIFS はデータフレーム送信時に適用される IFS であり、端末は送信開始前に DIFS 時間 ($34\mu s$) 待機してからデータフレームを送信する。一方、ACK(ACKnowledgment) フレームのように失敗すると再送制御が必要となる優先度の高い制御フレームは、DIFS 時間待つと他端末のデータフレームと競合する可能性があるため、より短い SIFS 時間 ($16\mu s$) を用いることで優先的に送信するように設定されている。

2.3. フレーム構成モデル化

本研究では、MAC 層に着目した無線 LAN 通信の挙動を評価するため、UDP(User Datagram Protocol) レベルのフレーム構成をモデル化し、図 2 にその構成図を示す。

無線 LAN フレームには PLCP(Physical Layer Convergence Protocol) プリアンブルや MAC ヘッダー、FCS(Frame Check Sequence) に加え、LLC(Logical Link Control) ヘッダーや IP ヘッダーなども含まれるが、シミュレーションの都合上省略し、モデル化した。

無線 LAN 通信では、データ送受信時に PLCP(Physical Layer Convergence Protocol) プリアンブルや MAC ヘッダー、FCS(Frame Check Sequence) などの制御情報のオーバーヘッドに加え、ACK フレームの送信や CSMA/CA 特有の DIFS・SIFS などのフレーム間隔、バックオフ動作も必要となる。

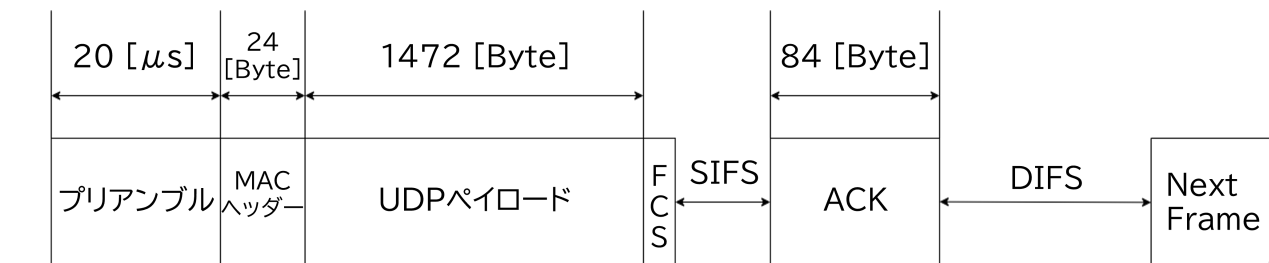


図 2: フレーム構成図

3. 実装とシミュレーション設定

本研究では、CSMA/CA 方式を用いた無線 LAN を再現するために、Python を用いてシミュレータを作成した。シミュレータには、各端末を管理する端末クラスを導入し、端末ごとの CW サイズや再送回数の管理、バックオフ時間を決定するためのスロット数の管理、再送処理などの機能を実装している。

また、シミュレータ本体は標準ライブラリである `random` のみに依存するように設計した。これにより、バージョン差異による影響を受けにくい後方互換性のあるシミュレータを実現した。

3.1. User クラスの設計

本研究のシミュレータ実装では、各端末を `User` クラスとして定義し、端末ごとの CW や再送回数などを管理している。表 1 に主なメンバ変数と役割をまとめる。

表 1: User クラスのメンバ変数とメソッドの一覧

名称	説明
メンバ変数	
<code>id</code>	端末を識別するための ID
<code>num_re_trans</code>	再送回数
<code>slots</code>	スロット数
<code>num_transmitted</code>	送信成功回数
<code>data_transmitted</code>	送信したデータ量 [bit]
主なメソッド	
<code>calc_slots()</code>	(2) 式に従い <code>slots</code> を決定
<code>re_transmit()</code>	再送処理
<code>reset_slots()</code>	新たに <code>slots</code> を割り当てる

3.2. シミュレーション条件

表 2 に、本研究で用いシミュレーション条件を示す。モードを選択することでそれぞれの無線 LAN 規格 (IEEE 802.11a/b/g) に対応できるように設計した。

表 2: シミュレーション条件の例

パラメータ	値・例
シミュレーション時間	60 s
スロット時間 (802.11a)	9 μ s
DIFS (802.11a)	34 μ s
SIFS (802.11a)	16 μ s
伝送レート	24 Mbps
端末数	80 台

4. 評価

横軸を端末数、縦軸をスループットとしたシミュレーション結果と理論値を図3に示す。

理論値との差が一番大きい端末数が80台の場合でも+2.75%程度の誤差に収まっていることが確認できる。また、端末数が増加するにつれて理論値との差が徐々に拡大することに対しては、参考とした文献[2]とのIP(Internet Protocol)レベルとUDPレベルのプロトコル上の違いからくるペイロード長の差などモデル化方法の違いが影響していると考えられる。以上の結果から、本研究で構築したCSMA/CAベースの無線LANモデルは、理論値に対して概ね一致し、最大でも誤差がおよそ3%にとどまることが示された。

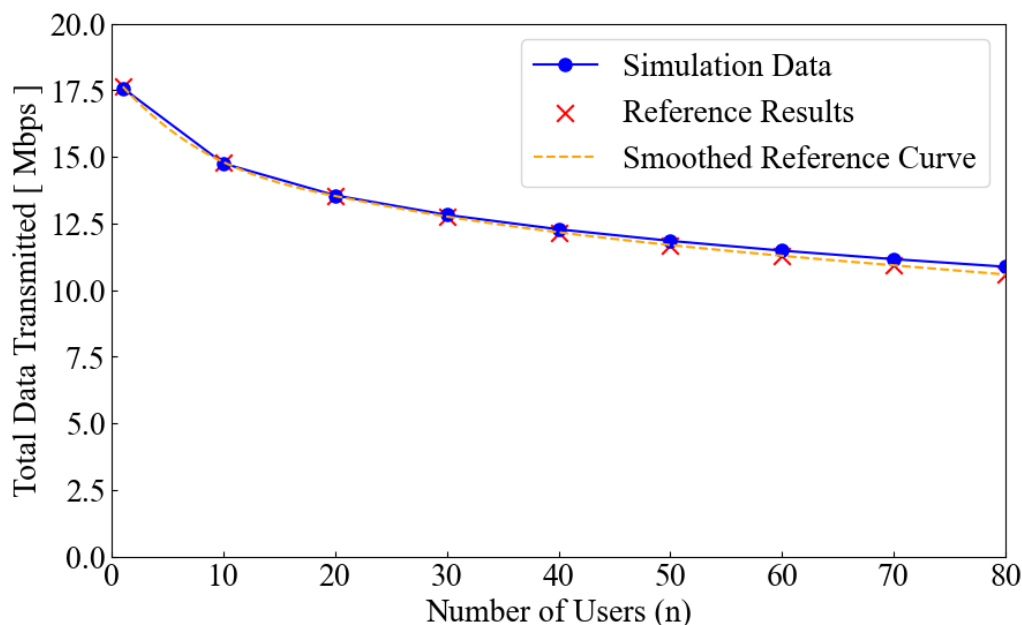


図3: シミュレーション結果

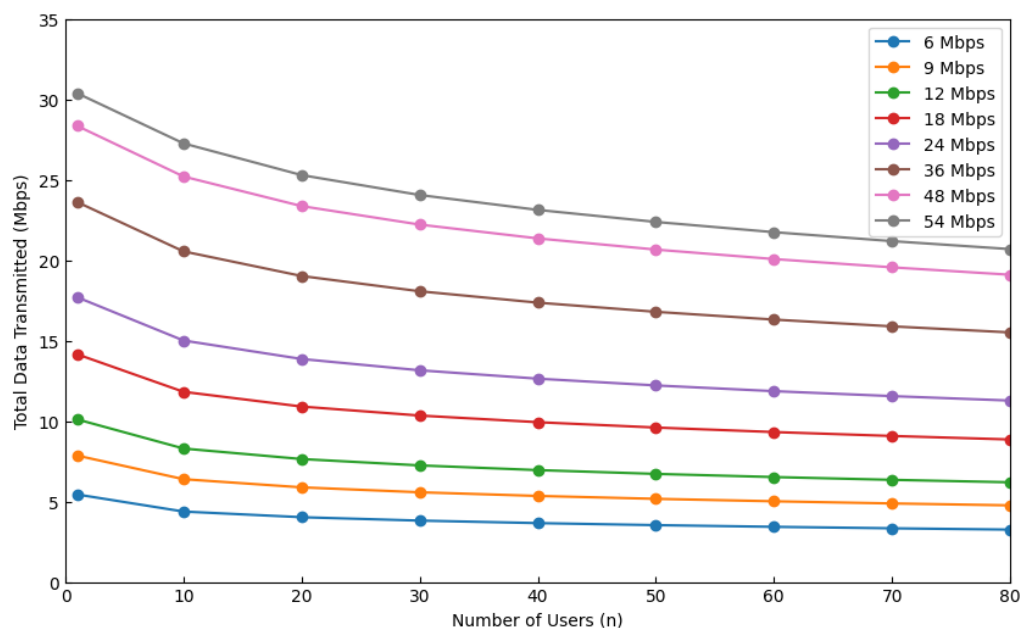


図4: シミュレーション結果

5. まとめ

本研究では、クロスレイヤシミュレータにおける CSMA/CA を中心とした無線 LAN システムのモデル化とそのシミュレータを開発し、精度を検証した。

今後の課題としては、連続送信ではなくポアソン分布などに従った送信間隔を導入し、より実際の通信頻度に近い状況を再現することが挙げられる。さらに、端末ごとに伝送速度を変えられるようにすることや、各端末やアクセスポイントの位置情報を踏まえて受信時の SNR (Signal-Noise Ratio) を考慮し、衝突時でもフレームの複合が可能となるキャプチャ効果を導入することで、より実環境に近い通信環境を再現することが挙げられる。

参考文献

- [1] 守倉正博, 久保田周治, 『インプレス標準教科書シリーズ 改訂三版 802.11 高速無線 LAN 教科書』, 株式会社インプレスコミュニケーションズ, 2016 年
- [2] Y. Morino, T. Hiraguri, H. Yoshino, K. Nishimori, T. Matsuda, “A Novel Collision Avoidance Scheme Using Optimized Contention Window in Dense Wireless LAN Environments*” *IEICE TRANS. COMMUN.*, VOL.E99-B, NO.11 NOVEMBER 2016
- [3] 西森健太郎, 平栗健史, 『MIMO から Massive MIMO を用いた伝送技術とクロスレイヤ評価手法』, コロナ社, 2017 年.
- [4] 設楽勇, 平栗健史, 谷口諒太郎, 西森健太郎, 『レイトレースを用いた 3 次元クロスレイヤシミュレータの開発』, 社団法人 電子情報通信学会 信学技報
- [5] IEEE 802.11 Standard for Local and Metropolitan Area Networks, “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” IEEE Std. 802.11, Mar. 2012.
- [6] 西森健太郎, 平栗健史, 『MIMO から Massive MIMO を用いた伝送技術とクロスレイヤ評価手法』, コロナ社, 2017 年.
- [7] 設楽勇, 平栗健史, 谷口諒太郎, 西森健太郎, 『レイトレースを用いた 3 次元クロスレイヤシミュレータの開発』, 社団法人 電子情報通信学会 信学技報