

クロスレイヤシミュレータにおける無線 LAN 評価モデルの検討

A Study of a Wireless LAN Evaluation Model in a Cross-Layer Simulator

T5-16 下沢亮太郎

指導教員 設楽勇

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 [1] に基づく CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 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 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、チャンネルが空いている (Idle) かどうかを確認する。チャンネルが 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、チャンネルが Idle 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持ち越す。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 [2]。

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) サイズは、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伴って増加する。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

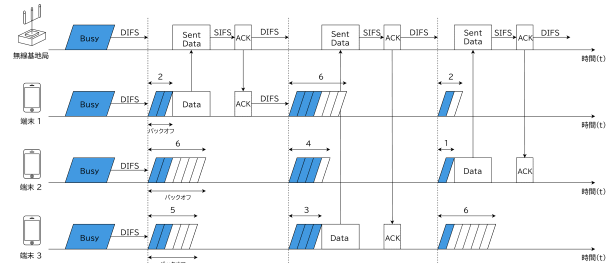
$$CW_{\max} = 2^{4+n} - 1 \quad (1)$$

$$s = \text{randint}(0, \min(c_{\max}, 1023)) \quad (2)$$

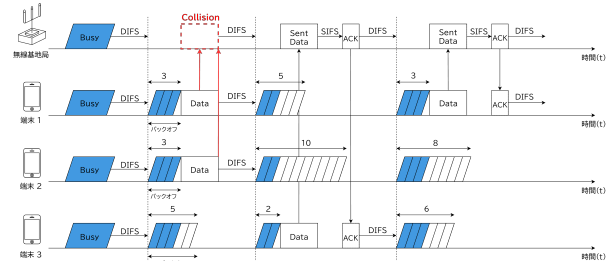
で求められる。

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 送信成功時



(b) CSMA/CA 衝突時

図 1: CSMA/CA の概要

2.1.1 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 ($16\mu\text{s}$) 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。

2.2 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) という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、バックオフ動作も含まれる。その他にも LLC(Logical Link Control) ヘッダや IP ヘッダなどが含まれるが、シミュレーションの都合でモデル化した。

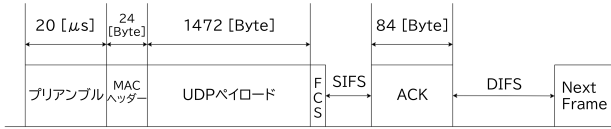


図 2: フレーム構成図

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 シミュレーション条件

表 1 に、本研究で用いた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 1: 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 μs |
| DIFS (802.11a) | 34 μs |
| SIFS (802.11a) | 16 μs |
| 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 [3] 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 [3] 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。

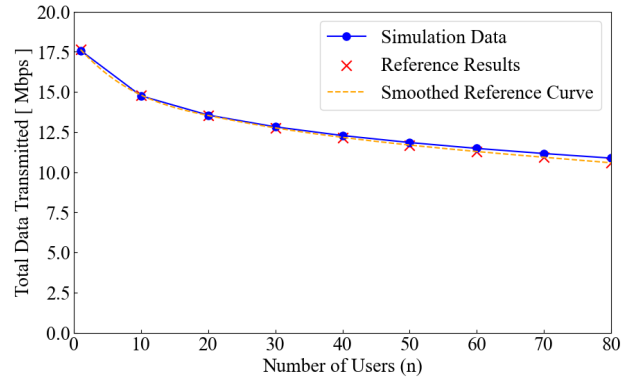


図 3: シミュレーション結果

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] 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.
- [2] 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
- [3] Y. Morino, T. Hiraguri, H. Yoshino, K. Nishimori, T. Matsuda, “A Novel Collision Avoidance Scheme Using Optimized Contention Window in Dense Wireless LAN Environments*” *IE-ICE TRANS. COMMUN.*, VOL.E99-B, NO.11 NOVEMBER 2016