

修士論文

無線全二重通信

マルチホップネットワークにおける
理論解析モデルの構築及び性能評価

令和2年度修了

三重大学大学院工学研究科

電気電子工学専攻

通信工学研究室

遊免 陽介



目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 本研究の目的	4
1.3 論文構成	5
第2章 従来研究	6
2.1 無線マルチホップネットワーク	6
2.1.1 無線マルチホップネットワークの概要	6
2.1.2 IEEE 802.11 DCF	7
2.2 無線全二重通信	9
2.2.1 無線全二重通信の基礎的技術	10
2.2.2 無線全二重通信 MAC プロトコル (FD MAC)	10
2.2.2.1 非同期型 FD MAC	11
2.2.2.2 同期型 FD MAC	11
2.2.3 無線マルチホップネットワークへの適用	12
2.3 無線マルチホップネットワークにおける数理モデルに基づく理論解析	13
2.3.1 エアタイム	13
2.3.2 飽和状態における最大スループットの算出	14

2.3.3	非飽和状態を考慮した理論解析	16
2.3.4	非同期型 FD MAC を適用した無線マルチホップネットワーク の性能解析	17
第 3 章	無線全二重通信マルチホップネットワークの理論解析	26
3.1	システムモデル	27
3.1.1	解析対象ネットワーク	27
3.1.2	解析対象ネットワークにおける FD MAC の動作	27
3.2	送信エアタイム	28
3.2.1	新たな送信エアタイムの表現	29
3.2.2	Φ_{HD_i} , Φ_{PR_i} , 及び Φ_{SC_i} の表現	31
3.3	キャリアセンスエアタイム	35
3.4	フレーム保持確率	38
3.5	送信失敗確率	38
3.6	セカンダリ送信確率	40
3.7	エンドツーエンドスループット	41
第 4 章	解析モデルの評価と FD MAC の性能解析	46
4.1	解析モデルの評価	46
4.1.1	エンドツーエンドスループット特性	46
4.1.2	最大エンドツーエンドスループット特性	47
4.2	FD MAC の性能解析	49
第 5 章	双方向フローを持つ無線全二重通信マルチホップネットワークの性能評 価	60

5.1 システムモデル	61
5.2 エンドツーエンドスループット特性	61
5.3 データペイロード長に対する最大エンドツーエンドスループット特性	62
 第 6 章 まとめと今後の課題	 68
 参考文献	 71
 謝辞	 76
 研究業績	 77

目 次

2.1	IEEE 802.11DCF のチャネルアクセス例 (制御フレームなし)	20
2.2	IEEE 802.11DCF のチャネルアクセス例 (制御フレームあり)	21
2.3	隠れ端末の存在する 3hop ネットワーク	22
2.4	非同期型 FD MAC のチャネルアクセス例	22
2.5	同期型 FD MAC のチャネルアクセス例	23
2.6	片方向フローが存在する直線状 H ホップネットワーク	24
2.7	FD MAC を考慮したマルコフ連鎖モデル	25
3.1	解析対象ネットワークにおける非同期型 FD MAC のチャネルアクセ ス例	42
3.2	解析対象ネットワークにおける同期型 FD MAC のチャネルアクセス例	43
3.3	本論文で用いたマルコフ連鎖モデル	45
4.1	同期型 FD MAC を適用した 5 ホップネットワークにおけるフレーム 保持確率特性 (ペイロード長: 500[bytes])	52
4.2	非同期型 FD MAC を適用した 5 ホップネットワークにおけるフレ ーム保持確率特性 (ペイロード長: 500[bytes])	53
4.3	5 ホップネットワークにおけるエンドツーエンドスループット特性 (ペ イロード長: 500[bytes])	54

4.4	H ホップネットワークにおけるホップ数 H に対する最大スループット (ペイロード長: 500[bytes])	55
4.5	5 ホップネットワークにおけるペイロード長に対する最大スループット	56
4.6	同期型 FD MAC における連続した送信失敗	57
4.7	同期型及び非同期型 FD MAC におけるオフアードロードに対するキャリアセンスエアタイム (5 ホップネットワーク, ペイロード長: 500[bytes])	58
4.8	同期型及び非同期型 FD MAC におけるオフアードロードに対する送信失敗確率 (5 ホップネットワーク, ペイロード長: 500[bytes])	59
5.1	双方向 2 ホップネットワーク	63
5.2	双方向 2 ホップネットワークにおけるフレーム保持確率特性 (ペイロード長:500[bytes])	64
5.3	$\beta \rightarrow 0$ としたときの双方向 2 ホップネットワークにおけるフレーム保持確率特性 (ペイロード長:500[bytes])	65
5.4	双方向 2 ホップネットワークにおけるスループット特性 (ペイロード長:500[bytes])	66
5.5	双方向 2 ホップネットワークにおけるペイロード長に対する最大スループット	67

表 目 次

3.1	HD, PR, SC 送信時における送信成功時間及び送信失敗時間	44
4.1	シミュレーションにおける IEEE 802.11a パラメータ諸元	51

第1章

序論

1.1 研究背景

近年, スマートフォンのような移動通信端末の普及や様々なアプリケーションの運用により, データトラフィック量が急増している. また利用形態も多様化しており, エンターテインメント産業における高画質映像の伝送や医療分野における地域医療ネットワークなど, 個人の利用だけでなく幅広い分野において無線通信の需要が高まっている [1]. このようなトラフィック量の増大や利用形態の多様化に対する対応は無線通信分野の大きな課題となっている. これらの背景から, 2020 年より第5世代移動通信システム (5G) の商用が開始しており, 現在も様々な分野への応用に向けた研究が盛んに行われている. この5Gでは従来の第4世代移動通信システム (4G) と比べて「超高速」な通信を可能にするほか, 「超低遅延」や「多数同時接続」といった機能が強化されている. 超低遅延の通信を実現することで, 濃霧中の運転補助や工事現場における遠隔操縦, 医師が遠隔で手術を行う遠隔医療などの実現が期待されている [2]. 多数同時接続ではモノとモノが無線通信によってつながる IoT (Internet of Things) を想定しており, 工場内のネットワークや自動車の安全運転を実現するための車車間通信, 温度などの環境情報を観測するセンサで構成される無線センサーネットワークなどが含まれる. これらのネットワークは様々な場所での構築が想定

されるため、基地局などのインターネットインフラの存在しないネットワーク形態や端末移動によるネットワークの変化に対応する必要がある。

このような背景から近年、基地局などを介さず端末間で通信を行う無線マルチホップネットワークが注目されている。無線マルチホップネットワークでは、各端末が中継機としてデータの中継を行うことができるため、広範囲に柔軟なネットワークを容易に形成することができる。このような特徴から、マルチホップネットワークはIoTネットワークを実現する基盤技術として期待されている。一般に、無線通信では複数端末が効率的に無線チャネルへアクセスできるようにMAC(Medium Access Control)プロトコルが規定されている。無線マルチホップネットワークは、ネットワーク全体を管理する集中制御局を必要とせず、各端末が自律的にチャネルアクセスを行い、データの送受信を行うことを前提としている。MAC方式にはCSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)方式が採用されている。CSMA/CA方式では、各端末は送信開始前に無線チャネルの使用状況を確認(キャリアセンス)する。しかし無線通信では、端末間の距離や障害物の影響によりお互いの送信信号を検知できない(キャリアセンスが効果的に機能しない)場合がある。このような位置関係をもつ端末は互いに「隠れ端末」と呼ばれる。広範囲なネットワークを形成する無線マルチホップネットワークでは隠れ端末が多数存在するため、これらの端末間で起こるデータ送信の衝突によりスループット性能が大きく劣化する。[3]-[10]。

このような課題に対して、無線マルチホップネットワークのスループット性能の向上が期待できる技術として無線全二重通信が注目を集めている。無線全二重通信は同一周波数帯で同時に送受信を可能とする通信技術である[11]。これまでの無線通信は半二重通信が一般的であり、自身の送信信号が受信信号に干渉するため同一周波数帯で同時に送受信を行うことが困難であった。しかし、近年の信号干渉除去技術の発展により送信信号の影響を緩和し、無線全二重通信が実現可能となりつつある

[11]-[13]. 無線全二重通信では同一周波数帯で同時に送受信が可能となるため周波数利用効率が向上し, 1対1の通信では半二重通信と比べて理論上2倍のスループットが達成可能となる. さらに, この全二重通信を CSMA/CA を用いたネットワークに適用させることで, 隠れ端末によるデータ送信の衝突を軽減できると期待されている [14], [15]. したがって, この全二重通信を無線マルチホップネットワークに適用させることでさらなる性能向上が見込まれ, 多くの関連研究が報告されている [16]-[23].

ところが, 無線マルチホップネットワークでは他端末からの干渉信号や端末間のデータ送信の衝突などの影響により全二重通信による性能向上の恩恵を最大限引き出せるとは限らない. 性能向上の恩恵を最大限に受けるためには, ネットワークプロトコルで規定する端末の動作がシステム全体の性能に与える影響を把握したうえで, 適切にプロトコルを設計する必要がある. 無線全二重通信ネットワークにおけるプロトコルが与えるシステム性能への影響を明らかにするうえで, 数理モデルを用いたネットワークの理論解析は有効な手法である. 理論解析モデルの構築により端末の動作がネットワーク性能に与える影響を確率的に把握できるため, 優れたプロトコル設計に対する有益な知見を得ることが可能となる.

以上の背景から, 文献 [8], [9] では無線全二重通信を適用した無線マルチホップネットワークにおける理論解析モデルが提案されている. 文献 [8], [9] では無線全二重通信の動作を各端末へ適用することに着眼して解析モデルを構築している. 無線全二重通信ネットワークのための MAC プロトコル (Full Duplex MAC protocol: FD MAC) は, 端末間での通信の開始タイミング調整方法により非同期型 FD MAC と同期型 FD MAC の2種に大別できる. 非同期型 FD MAC では, 送信するデータの一部に全二重通信を行う端末の情報が付加されており, その情報の受信直後に全二重通信を開始することで送信タイミングを調整している. 一方同期型 FD MAC では, データ送信前に交換する制御フレームに全二重通信を行う端末の情報が付加されて

おり、制御フレーム交換終了後に全二重通信を開始することで送信タイミングを調整している。文献 [8], [9] は、非同期型 FD MAC を適用した無線マルチホップネットワークのみを対象として、無線マルチホップネットワークの解析手法であるエアタイム解析理論 [5], [6] を適用して、FD MAC による隠れ端末抑制効果を新たに考慮することにより、無線全二重通信マルチホップネットワークの数理解析を可能にしている。しかし、文献 [8], [9] では、非同期型 FD MAC のみを前提としており、同期型 FD MAC を適用した無線全二重通信マルチホップネットワークの数理解析が困難である。同期型 FD MAC にも適用可能な無線全二重通信マルチホップネットワークの解析モデル構築のためには、文献 [8], [9] の解析モデルにおいて、さらに制御フレームの交換を考慮できるように拡張する必要がある。

また、同期型 FD MAC における制御フレームの交換は隠れ端末の送信を抑制する効果を持っており、非同期型 FD MAC と比べて隠れ端末によるデータの衝突を大きく抑制できる。この隠れ端末の送信抑制効果の違いによる性能への影響を明らかにすることは適切なプロトコルを設計するうえで重要であり、そのためには、隠れ端末の影響が極端に大きい環境において両 FD MAC のネットワーク性能を評価する必要がある。

1.2 本研究の目的

同期型及び非同期型 FD MAC を適用したときのネットワーク性能への影響を解明するため、本論文では、同期型 FD MAC 及び非同期型 FD MAC を適用可能な一般的な無線全二重通信マルチホップネットワークにおける理論解析モデルを提案する。本論文では1台の端末が生成したデータを1方向で中継する片方向フローのネットワークを対象に解析モデルを構築し、同期型及び非同期型 FD MAC それぞれの方式

による無線マルチホップネットワークの性能を評価する。同期型FD MAC への拡張をするために、その本質的な動作である、全二重通信開始前の制御フレーム交換の動作を考慮可能な新たなエアタイムの解析概念を提案する。新たに提案する解析モデルは、同期型FD MAC だけでなく、非同期型FD MAC にも適用可能であり、両方式の本質的な動作の違いがもたらすスループット性能への影響とその優位性を数学的な保障のもとで評価することが可能となる。

また、隠れ端末の影響が極端に大きい環境において両FD MAC のネットワーク性能への影響を評価するため、2 台の端末が生成したデータを双方向に中継する双方向フローネットワークを想定し、計算機シミュレーションを用いて評価を行う。片方向、及び双方向フローのネットワークに対して性能を評価することで、両FD MAC による隠れ端末の送信抑制効果の違いによる性能への影響を評価することが可能となる。

1.3 論文構成

第2 章では無線マルチホップネットワークにおける基礎的概要及び通信方式について記述する。また、無線全二重通信の基礎的技術事項及び通信方式について記述する。さらに、無線マルチホップネットワークにおける理論解析手法について記述する。第3 章では同期型及び非同期型FD MAC を適用した無線全二重通信マルチホップネットワークにおける理論解析手法を提案し、導出過程について記述する。第4 章では計算機シミュレーションを用いて得られる結果から、提案した理論解析モデルの妥当性を評価し、同期型及び非同期型FD MAC の性能の比較を行う。第5 章では隠れ端末の影響が大きいネットワークに対して、計算機シミュレーションにより同期型及び非同期型FD MAC の性能を調査する。第6 章で本論文の総括と今後の課題について記述する。

第2章

従来研究

本章では2.1節に無線マルチホップネットワーク技術の詳細について記述する。2.2節に無線全二重通信技術に関する技術的詳細及び無線全二重通信ネットワークにおけるMAC層技術について記述する。2.3節では無線マルチホップネットワークにおける理論解析技術について記述する。

2.1 無線マルチホップネットワーク

2.1.1 無線マルチホップネットワークの概要

無線マルチホップネットワークとは、基地局やアクセスポイントといったネットワークインフラや集中制御局を必要とせず、端末のみで自律的に動作して形成されるネットワークである。ネットワークを構成する各端末はデータの中継機としての役割も担い、データの宛先端末へデータの中継して転送する。宛先端末への経路を複数確保することも可能であり、ある経路において支障が起こったとしても、迂回経路を自律的に選択するため、ネットワーク全体へ与える影響は小さくなる。このように様々な状況および環境において、柔軟かつ容易にネットワークが形成されることから、車両同士が無線通信によって運転を支援するための情報を伝達する車車間通信システムや、温度・湿度といった環境情報をモニタリングする無線センサネットワーク

クなどに応用されている。

しかし無線マルチホップネットワークでは、各端末が自律分散的に動作するため、ネットワークの動作が複雑になり、性能を最大限に引き出すプロトコルの設計が困難となる。また、互いに通信を検知できない隠れ端末間でデータ送信の衝突が発生するため、スループットの低下やパケット破棄率の増加といった問題がある [3]-[10]。

2.1.2 IEEE 802.11 DCF

無線マルチホップネットワークでは、IEEE 802.11 DCF(Distributed Coordination Function) が MAC プロトコルとして採用されることが多い。DCF は、CSMA/CA 方式に基づく MAC プロトコルであり、フレーム送信を試みる端末は送信前にキャリアセンスすることで無線チャネルの使用状況を確認し、他の端末の送信をキャリアセンスしている間は送信を行わないことで他の端末との通信の衝突を回避する [24], [25]。しかし、端末と端末の間の距離が著しく離れている、または端末間に電波を遮蔽するような障害物が存在する場合、送信信号の受信が困難な端末が現れる。このとき互いの送信をキャリアセンスできず、CSMA/CA 方式で送信開始することにより、通信の衝突が起こりうる。このような互いの通信を検知できない関係にある端末が引き起こす通信の衝突は「隠れ端末問題」とよばれ、スループット低下の要因となる。

この解決策として RTS/CTS(Request To Send/Clear To Send) 方式と呼ばれる、RTS, CTS 制御フレームをデータの送信前に交換する方式がある。制御フレームはデータの送信を事前に通知するためのフレームであり、送信するデータ本体は含まれておらず、制御フレームの交換に成功した場合のみデータ送信を行う。制御フレームの交換によりオーバーヘッドは増大するが隠れ端末によるデータフレームの衝突が軽減でき、端末数の多いネットワークや隠れ端末問題の影響が大きいネットワーク

において有効である。図 2.1 及び図 2.2 に IEEE 802.11 DCF におけるチャネルアクセスの例を示す。ただし、図 2.1 は制御フレームを用いない方式、図 2.2 は RTS/CTS 制御フレームを用いる方式のチャネルアクセスの動作を示している。

まず制御フレームを用いない場合 (図 2.1(a)) について説明する。データフレームを持つ端末 0 は、データ送信を開始する前にキャリアセンスによりチャネルの使用状況を確認する。DIFS(DCF InterFrame Space) 期間の間チャネルがアイドル (チャネル未使用) であれば、さらに送信開始までの待機時間を設定する (バックオフ)。この待機時間 (バックオフタイマ) は毎回のフレーム送信ごとに設定され、バックオフタイマは $[0, CW)$ の範囲からランダムに決定される。ここで、 CW はコンテンションウィンドウと呼ばれる値であり、図 2.1 の例では、その値を 16 と設定している。タイマをカウントして 0 になったときにフレームの送信を開始する。このときチャネルがビジーになれば、チャネルがアイドルになるまでタイマを進めず待機し、アイドルであることを確認した後、再び DIFS 期間待機しカウントを再開する。端末 1 はデータフレーム受信後、SIFS(Short InterFrame Space) 期間待機し ACK(ACKnowledge) フレームを端末 0 へ返す。ACK フレームの受信により、端末 0 は送信成功と判断する。端末 1 でデータフレームの衝突が発生した場合は、ACK を返さない (図 2.1(b))。ACK の受信が確認できない場合、端末 0 はデータの送信が失敗したと判断し再送信を行うが、その再送信の衝突を回避するためにバックオフの時間をより長めに設定する。具体的には、再送信では CW の値を 2 倍に設定し、 $[0, 2CW)$ の範囲からランダムに決定する。したがって、 i 回目の再送時における CW の値は

$$CW_i = \min(2^i CW_{\min}, CW_{\max}) \quad (2.1)$$

となる。ここで、 CW_{\min} , CW_{\max} はそれぞれ CW の最小値, 最大値である。

次に RTS/CTS 制御フレームを用いる場合 (図 2.2(a)) について説明する。バック

オフタイマが0になった端末0はデータ送信を開始せず、RTS フレームを送信し、周囲の端末に自身のデータ送信の開始を通知する。端末0のデータ送信の宛先である端末1がRTS フレームを受信すると、SIFS 期間待機した後、データ送信を許可するCTS フレームを端末0へ返す。端末0は、このCTS フレームを受信することで、データフレームの送信を開始する。端末0及び端末1以外の端末がRTS またはCTS フレームを受信すると、フレーム送信の開始が一定期間禁止される。このデータ送信開始が禁止される期間はNAV(Network Allocation Vector)と呼ばれ、NAV 期間待機することで、端末0が送信するデータフレームとの衝突を回避する。隠れ端末同士でRTS フレームの送信が衝突した場合、受信側はCTS フレームを返すことができない(図2.2(b))。このとき、端末0はRTS フレームの送信が失敗したと判断し、再送信のプロセスへ進む。一般に制御フレームはデータフレームより短いため、制御フレームを用いずデータ送信を行う場合に比べて隠れ端末間のフレーム衝突頻度は低くなる。また同様の理由で、制御フレームを用いない場合に比べて送信失敗時のチャネル占有時間が短くなる。

2.2 無線全二重通信

2.2.1 節では、無線全二重通信を実現させるための既存技術について、2.2.2 節では無線全二重通信を適用したネットワークの動作について記述する。2.2.3 節では無線マルチホップネットワークに適用することによる利点とその課題について記述する。

2.2.1 無線全二重通信の基礎的技術

従来の無線半二重通信では、自身の送信アンテナから送信された信号が自身の受信アンテナに回り込むことによって発生する自己干渉により、同一周波数帯を用いて送受信を同時に行うことが不可能であった。この自己干渉の影響を抑制するためには約 110dB の低減が必要となっており、無線全二重通信の実現は不可能であると考えられていた [11]。しかし、文献 [12] で提案された自己干渉除去技術によって約 73dB の低減が報告されている。文献 [12] では平衡不平衡変成器を用いたアナログキャンセル技術が提案されており、デジタル領域におけるキャンセルを伴う信号反転キャンセルを組み合わせることで自己干渉を低減している。具体的には、受信したアナログ信号に逆位相の送信信号を加え自身の送信信号のみを除去し、デジタル信号に変換した後に自身のデジタル送信信号と受信信号の相関を取ることで、アナログ信号の時点で除去しきれなかった自身の送信信号を取り除いている。また、文献 [13] では 1 本の送受信アンテナで 110dB の自己干渉を除去している。

2.2.2 無線全二重通信 MAC プロトコル (FD MAC)

無線ネットワークにおいて無線全二重通信の性能を最大限に引き出すためには、自己干渉除去技術の向上だけでなく MAC 層での適切なプロトコル設計が要求される。これまで提案されている FD MAC の多くは CSMA/CA 方式に基づいている。自律分散型ネットワークにおける FD MAC では、全二重通信を行う端末を端末間で自律的に決定し、その送受信のタイミングを合わせる必要がある。FD MAC では、このタイミングの調整方法という観点から、制御フレームを用いない非同期型 FD MAC [12], [16]-[18] と、制御フレームを用いる同期型 FD MAC [19]-[23] の 2 種類が存在する。図 2.3 に示すような隠れ端末の存在する 3 ホップネットワークを対象に、それぞれの方

式の特徴をまとめる。

2.2.2.1 非同期型 FD MAC

図 2.4 に、非同期型 FD MAC におけるチャネルアクセス例を示す。非同期型 FD MAC の特徴として、データフレーム内のヘッダ部分に全二重通信のペアとなる端末情報を含め、そのヘッダ部を該当端末が受信することで全二重通信を開始する (図 2.4(a)) [12]。この全二重通信において、タイマを 0 にした端末の送信をプライマリ送信、プライマリ送信を受信することで開始される送信をセカンダリ送信と呼ぶ。セカンダリ送信は隠れ端末の送信抑制効果をもっており、プライマリ送信端末と隠れ端末の関係にある端末 2 はこのセカンダリ送信を検知するため、制御フレームを使うことなく端末 0 と端末 2 の間でフレームの衝突を回避することができる。また、プライマリ送信とセカンダリ送信の終了タイミングが異なる場合は先に送信終了した端末 (端末 0) がビジートーンと呼ばれる信号を送信し、セカンダリ送信が続いていることを知らせ他端末の送信を抑制する。

このように非同期型 FD MAC では、データフレーム内のヘッダ部分に付与した情報を用いて全二重通信を行いながら、少ないオーバーヘッドで隠れ端末の衝突を回避できる。

2.2.2.2 同期型 FD MAC

同期型 FD MAC におけるチャネルアクセス例を図 2.5 に示す。同期型 FD MAC ではデータ送信前に制御フレームを交換しており、受信側のチャネル状況を確認するとともに全二重通信のタイミング調整を行っている。全二重通信を行う際には、半二重通信時に用いていた CTS フレームの代わりに、全二重通信の許可要求に関する

情報が付加された FCTS(Full-duplex CTS) フレームを送信し、セカンダリ受信端末のチャネル状況を確認した後、全二重通信を行っている [22]. これらの制御フレームを端末間で交換することで、全二重通信のプライマリ送信端末およびセカンダリ送信端末を決定し、これらの端末の周辺端末にも全二重通信の情報を制御フレームを介して通知することで、通信の失敗を回避している.

同期型 FD MAC では半二重通信の場合と同様に制御フレームによるオーバーヘッドがあるが送信失敗時にデータフレームを送信しないため、非同期型 FD MAC とは異なり送信失敗時のチャネル占有時間が短くなる.

2.2.3 無線マルチホップネットワークへの適用

無線マルチホップネットワークでは、隠れ端末の影響により、スループットの低下やパケット破棄率の増加といった課題が挙げられる [5]. そこで、このネットワークに無線全二重通信を適用すると、2 端末が同時に送信を行うためデータの中継効率が増加する. また 2.2.2 節で言及したように、非同期型 FD MAC ではプライマリ送信に対する隠れ端末との衝突軽減効果が、同期型 FD MAC では全端末のデータ送信に対して隠れ端末による衝突軽減効果が得られる. 結果として、無線全二重通信の適用はネットワークのスループット向上だけでなく、隠れ端末との送信の衝突によるパケット破棄の低減も期待できる [14], [15].

2.3 無線マルチホップネットワークにおける数理モデルに基づく理論解析

本節では無線マルチホップネットワークを対象とした理論解析手法について記述する。2.3.1 節では無線マルチホップネットワークにおいて有効な解析手法である「エアタイム」について記述する。2.3.2 節ではエアタイムの解析手法を用いた、任意のトポロジーにおける飽和スループットの解析手法について記述する。2.3.3 節では、待ち行列理論とエアタイムの解析手法を用いて、端末ごとのバッファの振舞いを表現した非飽和状態におけるスループットの解析手法について記述する。2.3.4 節では、非同期型 FD MAC を適用した無線マルチホップネットワークの解析手法について記述する。

2.3.1 エアタイム

エアタイムとは文献 [5] で提案された概念であり、各端末の状態の時間割合を定義することで個々の振る舞いを表現している。各端末の状態はフレーム送信、キャリアセンス、チャンネルアイドルの3つに分けられており、それらの時間割合をエアタイムとして定義される。端末ごとにこれらの状態の時間割合を表現できることから、マルチホップネットワーク下における端末ごとの振る舞いの違いを表現することに適している。エアタイムの利点として、キャリアセンス及び隠れ端末間の衝突を送信エアタイムを用いて表現できることが挙げられる。キャリアセンスは近隣端末の送信エアタイムの和で表現でき、隠れ端末による衝突は隠れ端末間の送信エアタイムの重なりで表現できる。

文献 [5] における3つのエアタイムの導出方法を記述する。送信エアタイムは十

分に長い時間 $[0, Time]$ で, 端末 i がフレーム送信に使用した時間の比として定義される. このフレーム送信には端末 i の DIFS 期間 ($DIFS$), データフレーム送信期間 ($DATA$), SIFS 期間 ($SIFS$), ACK 送信期間 (ACK) を含む. したがって, 端末 i のフレーム送信期間を S_i とすると, 送信エアタイムは

$$X_i = \lim_{Time \rightarrow \infty} \frac{S_i}{Time} \quad (2.2)$$

で表せる. この送信エアタイムを用いて, $[0, Time]$ に端末 i がキャリアセンスをして
いた時間の割合であるキャリアセンスエアタイムは,

$$Y_i = \frac{\bigcup_{j \in \nu(i)} S_i}{Time} = \sum_{j \in \nu(i)} X_i - \sum_{A \notin \nu(i) \cup B; A, B \in \nu(i)} \frac{X_A X_B}{1 - \sum X_C}, C \in \mu(i, j) \quad (2.3)$$

となる. ここで, $\nu(i)$ は端末 i のキャリアセンス内に存在する端末の集合である. $\mu(i, j)$ は, 端末 i と端末 j のキャリアセンス内に存在する端末の集合である. また, $[0, Time]$ に端末 i がバックオフタイマのカウントに要する時間の割合であるアイドルエアタイムは,

$$Z_i = 1 - X_i(1 - \gamma_i^{\text{con}}) - Y_i \quad (2.4)$$

となる. ここで, γ_i^{con} は端末 i と端末 i のキャリアセンス範囲内にある端末が同時にバックオフタイマを 0 にしたことによる送信失敗確率である.

2.3.2 飽和状態における最大スループットの算出

文献 [5] は解析仮定としてホップ数とネットワークポロジに制限を設けている. それに対して文献 [6] は文献 [5] の解析手法を発展させ, 任意のホップ数とネットワークポロジに対応した解析手法を提案している. 飽和状態におけるエンドツーエン

ドスループットは、送信エアタイムを用いて各端末のリンクごとのスループットを算出後、フロー制限の概念を用いてネットワーク内のフローと関連付けることによって導出できる。端末 i の最大スループットは、データ送信成功時に費やす時間とデータレートの積で表すことができ、

$$E_i = X_i \times (1 - \gamma_i) \times \frac{DATA}{T} \times \text{datarate} \quad (2.5)$$

となる。ここで、 γ_i は端末 i の送信失敗確率であり、 $T = DIFS + DATA + SIFS + ACK$ である。マルチホップネットワークは複数端末を経由するフローを形成するため、エンドツーエンドの最大スループットはフロー内に存在する各端末の最大スループットの中で最も小さい値と等しくなる。ここで、最大スループットが最も小さい値となる端末をボトルネック端末 i_B とすると、

$$X_{i_B} = Z_{i_B} \tau_{i_B} T \quad (2.6)$$

を満たす。ここで、 τ_{i_B} は端末のフレーム送信試行確率を表しており、文献 [28] から

$$\tau_i = \frac{1 + \gamma_i + \gamma_i^2 + \cdots + \gamma_i^m}{\frac{W_0}{2} + \frac{W_1}{2} \gamma_i + \frac{W_1}{2} \gamma_i^2 + \cdots + \frac{W_1}{2} \gamma_i^m} \quad (2.7)$$

と表せる。ただし、 m は最大再送回数である。各端末がフローによってつながれた場合、ボトルネック端末以外の端末のスループットはボトルネック端末のスループットに制限されるため、各端末の最大スループットは

$$E_K = E_{i_B}, \quad \text{for } K = 1, 2, \dots, N \text{ other than } i_B \quad (2.8)$$

を満たす。式 (2.8) はフロー制限と呼ばれる。エンドツーエンドの最大スループット E は

$$E = E_{i_B} \quad (2.9)$$

となる。

2.3.3 非飽和状態を考慮した理論解析

文献 [5], [6] ではネットワーク内の全端末が常にバッファにデータを保持している飽和状態を想定している. しかし実環境では, 端末のバッファが飽和状態であるとは限らない. 各端末のバッファの振舞いを解析的に表現することは無線マルチホップネットワークの本質的な理解のために重要である. そこで文献 [7] では文献 [6] に待ち行列理論を適用し, 非飽和状態におけるスループット及び遅延解析を行っている. 図 2.6 に示すような直線状マルチホップネットワークを考え, 端末 0 が宛先端末 H のフレームを生成すると仮定する. 直線状トポロジでは, 各端末は端末 0 が生起したフレームを中継し宛先へ送信する. したがって, 端末 0 のオフアドロードを O とすると, ネットワークが非飽和状態のときの各端末のスループットは

$$O = E_0 = E_1 = \cdots E_{H-1} \quad (2.10)$$

を満たす. 非飽和状況を表現するために, 文献 [7] では端末 i がチャネルをアイドルだと判断しているときに少なくとも 1 つのフレームを保持している確率をフレーム保持確率と定義している. フレーム保持確率はチャネルアイドル状態とバックオフカウント状態の時間の比で表現され, バックオフカウント状態の時間は端末のフレーム受信数を表すフレーム到着率と 1 つのフレーム送信成功までの平均バックオフカウント時間の積で表現される. 解析仮定より, 端末 0 のみがフレームを生起し他の端末はその生起されたフレームを中継するため, 端末 i のフレーム到着率は

$$\lambda_i = \begin{pmatrix} \frac{O}{P} & \text{for } i = 0 \\ \frac{E_{i-1}}{P} & \text{for } i = 1, 2, \dots, H-1 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

と表せる. ここで P はペイロードサイズである. また, 1つのフレーム送信成功までの平均バックオフカウント数は

$$U_i = \frac{W_0}{2} + \frac{W_1}{2}\gamma_i + \frac{W_1}{2}\gamma_i^2 + \cdots + \frac{W_1}{2}\gamma_i^m \quad (2.12)$$

と表せる. よって, システムスロット期間を σ とすると, 端末 i のフレーム保持確率はチャネルアイドルエアタイム Z_i を用いて

$$q_i = \min\left(\frac{\lambda_i U_i \sigma}{Z_i}, 1\right) = \min\left(\frac{\lambda_i U_i \sigma}{1 - X_i - Y_i}, 1\right) \quad (2.13)$$

と表せる. 無線マルチホップネットワークでは端末ごとにキャリアセンス状況が異なり, チャネルがアイドルである確率が異なるため, フレーム保持確率も同様に異なる値を持つ. このフレーム保持確率はキャリアセンスエアタイムとフレームの送信失敗確率を考慮しており, フレーム保持確率が最も高い端末がネットワークのスループットを制限しているボトルネック端末となる. ネットワークが飽和状態となりエンドツーエンドスループットが最大となると, ボトルネック端末は常にフレームを1つ以上保持している状態となり, フレーム保持確率が1となる. つまり, ネットワークの最大スループットはオフアードロードを上昇させた時にボトルネック端末のフレーム保持確率が1となった時点のオフアードロードの値として得られる.

2.3.4 非同期型 FD MAC を適用した無線マルチホップネットワークの性能解析

解析手法の構築には無線全二重通信のふるまいを端末ごとに表現する必要がある. そこで文献 [9] では, 端末ごとのふるまいの表現に有効なエアタイムによる解析手法と, マルコフ連鎖モデルを用いて FD MAC の本質的な動作を表現している文献 [29]

の解析手法を統合することで新たな理論解析モデルを構築している。マルコフ連鎖とは、未来の挙動は現在の値のみで決定され過去の挙動は無関係である確率過程（マルコフ過程）のうち、とり得る状態が離散的なもののことを言う。

解析の対象となるネットワークは、図 2.6 に示される直線状 H ホップネットワークを想定しており、端末 0 のみがデータを生起することを想定している。各端末の送信範囲とキャリアセンス範囲は等しく 1 ホップ先までであり、端末 i ($i = 0, 1, \dots, H-2$) と端末 $i+2$ は互いに隠れ端末の関係にあるとする。また 2.2.2.1 節で言及したように、非同期型 FD MAC 適用時にはセカンダリ送信によってプライマリ送信が隠れ端末との衝突なしに送信できるため、プライマリ送信時の送信失敗確率は 0 としている。

各端末の無線全二重通信の動作を表現するために、文献 [9] では端末ごとに定義されている送信エアタイムを半二重 (HD) 送信、プライマリ (PR) 送信、セカンダリ (SC) 送信の 3 つに分けることを提案している。これを達成するために、文献 [29] で提案されたマルコフ連鎖モデルを用いて各端末の HD 送信と FD 送信の割合を表現し、端末ごとに HD 送信時、FD 送信時の送信エアタイムを導出している。これらの送信エアタイムを用いてキャリアセンスエアタイムや送信失敗確率、セカンダリ送信確率を表現することにより、端末ごとの無線全二重通信の動作を表現可能な解析モデルを構築している。

図 2.7 に FD MAC の動作を考慮したマルコフ連鎖モデルを示す。このマルコフ連鎖モデルは FD MAC におけるバックオフタイマのカウントから送信開始に至るまでの状態を示しており、 γ_i と β_i は端末 i のフレーム送信失敗確率と SC 送信確率を示す。確率 β_i で表される遷移が SC 送信を表しており、SC 送信の特徴であるバックオフタイマが 0 でないときの送信を考慮している [29]。また、 W_s は s 番目のバックオフ

フステージにおける CW の最大値を示しており

$$W_s = \min(2^s CW_{\min}, CW_{\max}) \quad (2.14)$$

である。端末 i が s 番目のバックオフステージでバックオフタイマが k である状態は状態 $(s, k)_i$ と示される。したがって、状態 $(s, k)_i$, $s \in [0, m]$, $k \in [0, W_s - 1]$, はバックオフタイマカウント状態を示し、状態 $(s, -1)_i$, $s \in [0, m]$, は送信状態を示す。文献 [9] はこのマルコフ連鎖モデルから各端末の送信確率に対するバックオフタイマが 0 のときの送信確率の比を算出し、各端末の FD 通信を行う割合を導出している。この比を用いて、各端末で定義されている送信エアタイムを HD, PR, 及び SC 送信による送信エアタイムの 3 つに分け、導出している。このように送信エアタイムを HD, PR, 及び SC 送信の 3 パターンに分類して表現することで、全二重通信の特徴である送受信を同時に行っている期間を考慮している。その後、導出された送信エアタイムを用いることで全二重通信の動作を考慮した端末ごとのキャリアセンスエアタイムやフレーム送信失敗確率などを導出する。詳細な導出過程は 3 章にて記述する。

このように、文献 [9] ではマルコフ連鎖モデルとエアタイムの解析手法を統合することで無線全二重通信マルチホップネットワークの解析手法を構築している。しかし、文献 [9] は非同期型 FD MAC を対象として解析モデルを構築しており、同期型 FD MAC の特徴であるデータ送信前の制御フレームの動作は考慮していない。同期型 FD MAC を対象として解析をするためには制御フレームの動作を考慮する必要があり、文献 [9] の解析モデルでは同期型 FD MAC を適用した無線マルチホップネットワークの解析を行うことはできない。

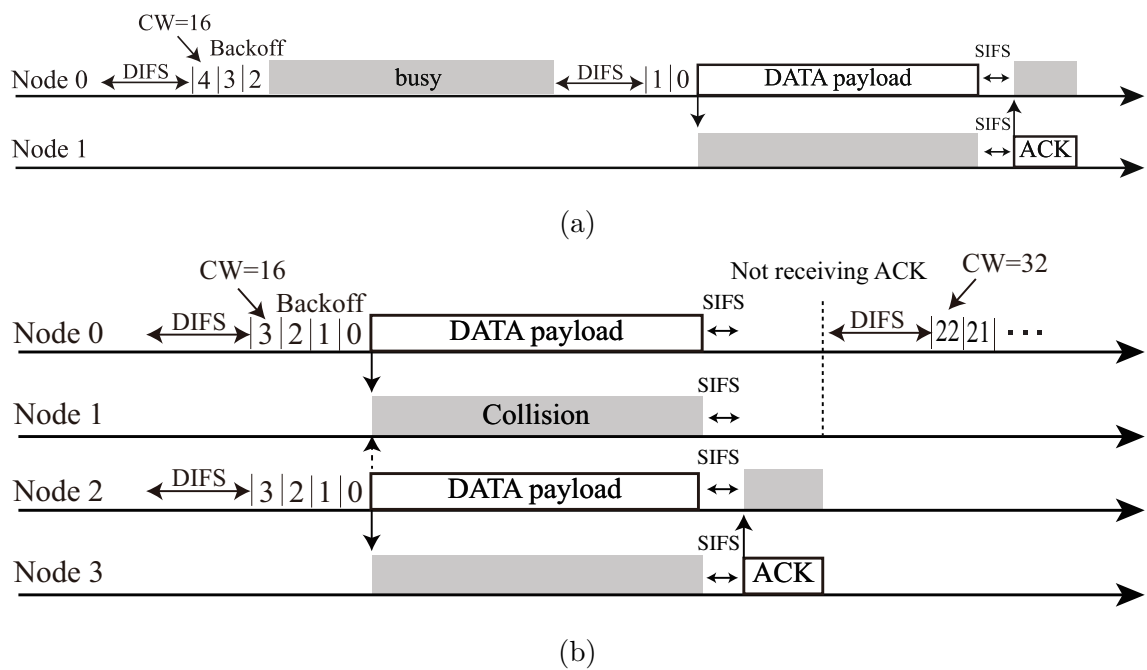


図 2.1: IEEE 802.11DCF のチャネルアクセス例 (制御フレームなし)

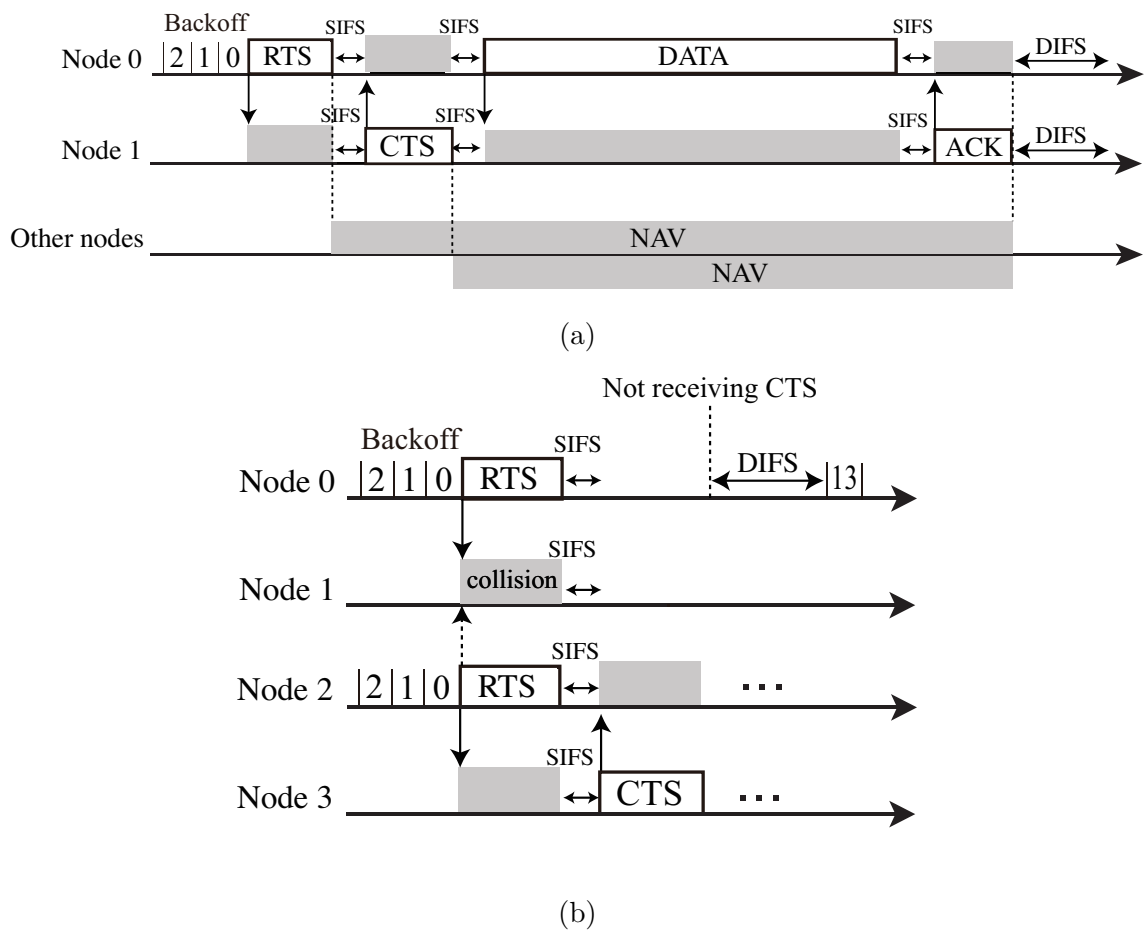


図 2.2: IEEE 802.11DCF のチャネルアクセス例 (制御フレームあり)

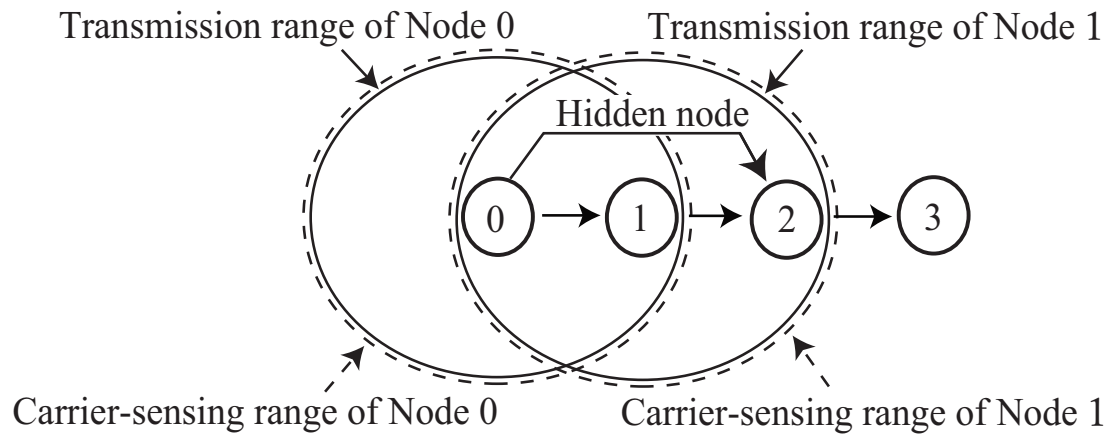


図 2.3: 隠れ端末の存在する 3hop ネットワーク

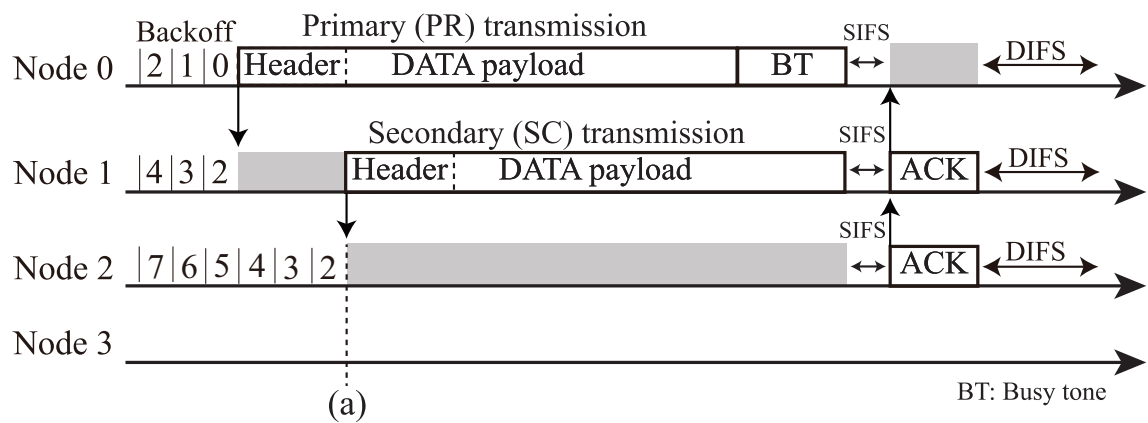


図 2.4: 非同同期型 FD MAC のチャネルアクセス例

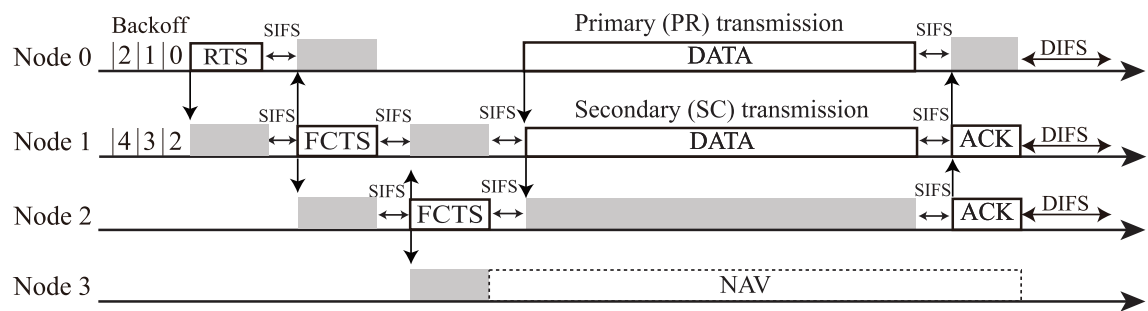


図 2.5: 同期型 FD MAC のチャネルアクセス例

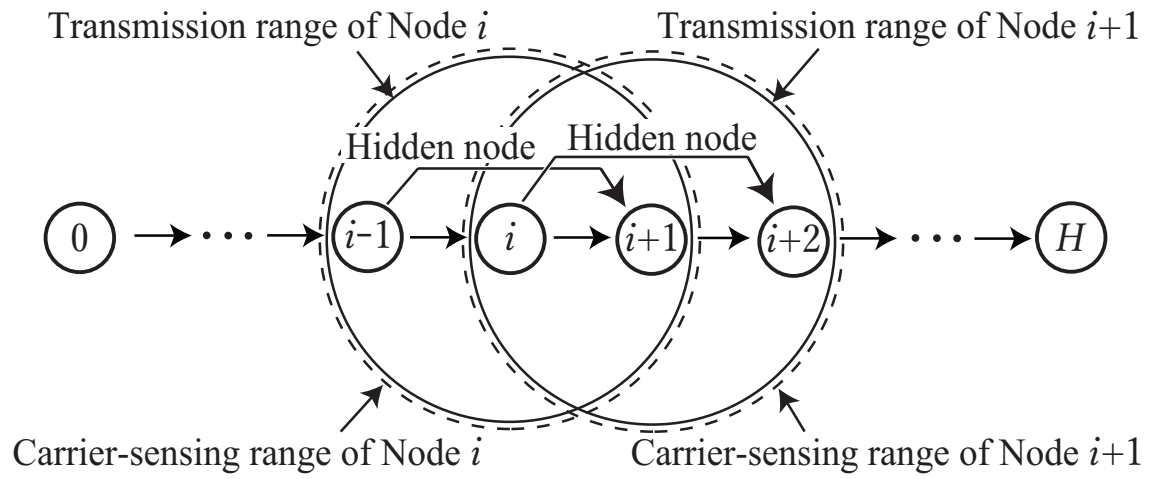


図 2.6: 片方向フローが存在する直線状 H ホップネットワーク

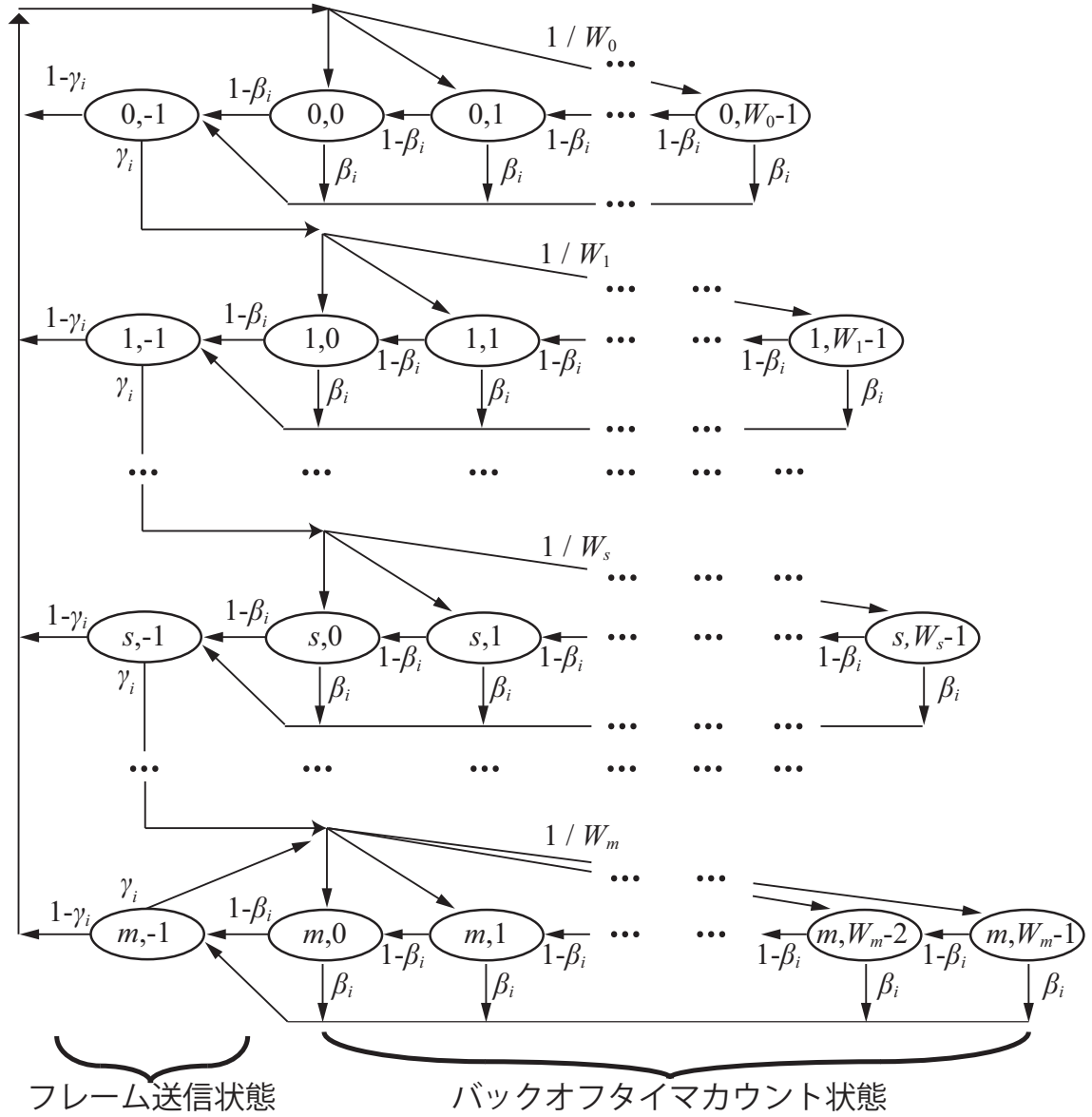


図 2.7: FD MAC を考慮したマルコフ連鎖モデル

第3章

無線全二重通信

マルチホップネットワークの理論解析

本論文では同期型 FD MAC 及び非同期型 FD MAC を用いた無線全二重通信マルチホップネットワークにおけるスループット解析モデルの提案を行う。提案する理論解析モデルは制御フレームの有無による動作の違いと FD MAC の動作を同時に考慮した新たな送信エアタイムを導出し、これを用いて端末ごとの振る舞いを表す数式を構築する。いくつかの数式及びパラメータを同期型及び非同期型 FD MAC で切り替えることで、両 FD MAC 適用時のエンドツーエンドスループットを算出する。3.1 節に本解析のシステムモデルを示す。3.2 節では同期型及び非同期型 FD MAC 両方に適用可能な送信エアタイムの導出について記述する。3.3 節では同期型及び非同期型 FDMAC を適用したときの、それぞれの場合における各端末のキャリアセンスエアタイムの導出について記述する。3.4 節ではエンドツーエンドの最大スループット導出に用いるフレーム保持確率の導出について記述する。3.5 節では同期型及び非同期型 FDMAC を適用したときの、それぞれの場合における各端末の送信失敗確率の導出について記述する。3.6 節ではセカンダリ送信確率について記述する。3.7 節ではエンドツーエンドスループットの導出について記述する。

3.1 システムモデル

3.1.1 解析対象ネットワーク

本論文では、図 2.6 のような H ホップの直線状無線マルチホップネットワークを対象とする。本論文の仮定を以下に示す。

1. 端末 0 のみがペイロードサイズ、 P バイトの UDP データフレームをポアソン分布にしたがって生成し、宛先端末は端末 H とする。端末 i ($i = 1, 2, \dots, H - 1$) は端末 $i - 1$ から受信したデータフレームを端末 $i + 1$ へ転送し、自身でデータフレーム生成は行わない。
2. 伝搬環境は理想的で、全二重通信時の自己干渉は完全に除去される。したがって、隠れ端末間のフレーム送信による衝突及び NAV を設定している端末への送信時にフレームの送信は失敗する。
3. 各端末の送信範囲はキャリアセンス範囲と等しい。したがって、端末 i のキャリアセンス範囲には端末 $i + 1$ と端末 $i - 1$ が存在し、端末 i と端末 $i + 2$ は隠れ端末の関係にある。

3.1.2 解析対象ネットワークにおける FD MAC の動作

図 3.1 及び図 3.2 に、本論文の対象となるマルチホップネットワークに非同期型 FD MAC 及び同期型 FD MAC を適用した場合におけるデータフレームの送信成功例、送信失敗例を示す。なお、送信成功の動作は 2.2.2 節で言及しているため省略し、送信失敗時の動作について説明する。

非同期型 FD MAC(図 3.1(b)) では、端末 1 がプライマリ送信のヘッダ部分を受信

した際に、全二重通信が可能でない場合はセカンダリ送信を行わず、端末0は半二重通信のままデータの送信を行う。その結果、端末2はデータの送信を開始でき、隠れ端末間でフレーム衝突が起こる。非同期型FD MACではデータの送信失敗はデータフレーム送信後のACKフレーム受信時に判断できるため、送信失敗時にも成功時と同等の時間を要する。なお送信の成功時間及び失敗時間は、図3.1の”Success duration”及び”Failure duration”で示される。

一方同期型FD MAC(図3.2(b))では、端末0のRTSフレーム送信中に端末2がRTSフレームを送信すると、端末1は端末0のRTSフレームを正常に受信できないため、FCTSフレームを返さない。結果として、端末0はFCTSフレームを受信できなかったタイミングで送信失敗と判断し再送のプロセスへ進む。このように非同期型FD MACとは異なり、同期型FD MACは制御フレームの交換によって送信失敗していることを検知できる。送信の成功時間及び失敗時間は、図3.2の”Success duration”及び”Failure duration”となる。非同期型FD MACと異なり送信失敗に要する時間が送信成功に要する時間に比べて非常に短くなる。

3.2 送信エアタイム

本論文では無線全二重通信の動作を考慮しているため、各端末は半二重送信だけでなくプライマリ送信、セカンダリ送信も行う。3.1.2節で言及したように、非同期型FD MACでは送信成功時に要する時間と失敗時に要する時間が等しい一方、同期型FD MACでは送信成功時に要する時間と失敗時に要する時間は大きく異なる。これにより従来の非同期型FD MACの解析手法[9]を直接適用することはできない。そこで、本論文では1フレームの送信成功までに要する送信時間に着目して送信エアタイムの導出を行う。

3.2.1 新たな送信エアタイムの表現

端末 i の送信成功時の1フレームの送信時間を d_i^{suc} , 送信失敗時の1フレームの送信時間を d_i^{fail} と定義する. 送信失敗確率 γ_i を用いると, 1フレームの平均送信試行回数は

$$R_i = 1 + \gamma_i + \gamma_i^2 + \cdots + \gamma_i^m \quad (3.1)$$

と表せる. ここで m は最大再送回数である. つまり, $R_i - 1$ は端末 i の1フレーム送信成功までに要する平均再送回数となる. したがって, 再送信を含む1データフレームの送信成功までの平均時間は $d_i^{\text{suc}} + (R_i - 1)d_i^{\text{fail}}$ と表せる. 送信エアタイムは端末の合計送信時間の割合であるため, 端末 i の送信エアタイム X_i はフレーム到着率 λ_i と送信成功までにかかる平均時間の積で表せる. したがって,

$$X_i = \lambda_i [d_i^{\text{suc}} + (R_i - 1)d_i^{\text{fail}}] \quad (3.2)$$

となる. 送信エアタイムを式 (3.2) のように表すことで, 同期型 FD MAC の特徴である送信成功時間と失敗時間の違いを考慮することができる.

文献 [9] の手法をもとに, FD MAC の動作を考慮した送信エアタイムを導出する. FD MAC の動作を表現するためには, 送信エアタイム X_i を HD, PR, SC の3パターンの送信に分けて導出する必要がある. 文献 [9] では送信エアタイムを分けるために, 端末 i の送信回数に対する HD, PR, SC 送信それぞれの割合を $\Phi_{\text{HD},i}$, $\Phi_{\text{PR},i}$, $\Phi_{\text{SC},i}$ と定義し, これらを用いてそれぞれの送信エアタイムを導出している. 本研究では HD, PR, SC の送信それぞれの場合において式 (3.2) を適用することでそれぞれの送信エアタイムを導出する. まず平均再送回数を表すために用いる送信失敗確率 γ について考える. 同期型 FD MAC では送信失敗のメカニズムは HD, PR, SC 送信全ての場合において, 同様であるため, HD, PR, SC 送信の失敗確率 γ_{HD} , γ_{PR} , γ_{SC} はすべて等

しい。つまり, $\gamma_{\text{HD}} = \gamma_{\text{PR}} = \gamma_{\text{SC}} = \gamma$ を満たすとする。これは端末 i の HD, PR, SC 送信全てにおいて平均再送回数は等しく $R_i - 1$ で表せることを意味している。一方非同期型 FD MAC では, セカンダリ送信により隠れ端末の送信開始を抑制できるため, PR 送信の失敗は生じないとする。一方, HD 及び SC 送信に対しては, 隠れ端末が送信開始することで送信の失敗が生じると考えると, $\gamma_{\text{PR}} = 0, \gamma_{\text{HD}} = \gamma_{\text{SC}} = \gamma$ である。これは端末 i の HD, SC 送信において平均再送回数は等しく $R_i - 1$ で表すことができ, PR 送信においては $R_i - 1 = 0$ を常に満たすことを意味している。次に送信成功時間と失敗時間について考える。HD, PR, SC 送信の成功時間及び失敗時間をそれぞれ $T_{\text{HD}}^{\text{suc}}, T_{\text{PR}}^{\text{suc}}, T_{\text{SC}}^{\text{suc}}$, 及び $T_{\text{HD}}^{\text{fail}}, T_{\text{PR}}^{\text{fail}}, T_{\text{SC}}^{\text{fail}}$ と定義すると, それぞれのパラメータは表 3.1 のように表される。同期型 FD MAC の場合 HD, PR, SC 全ての送信パターンにおいて制御フレームを用いるため, 各送信パターンの送信成功時間と失敗時間は異なる。なお表 3.1 において, 非同期型 FD MAC では隠れ端末間の衝突抑制効果により PR 送信の失敗は起こらないため, 非同期型の $T_{\text{PR}}^{\text{fail}}$ は省略する。

上記の変数を用いて, HD, PR, SC 送信時の送信エアタイム $X_{\text{HD}_i}, X_{\text{PR}_i}, X_{\text{SC}_i}$ は式 (3.2) より

$$\begin{aligned}
 X_{\text{HD}_i} &= \Phi_{\text{HD}_i} \lambda_i [T_{\text{HD}}^{\text{suc}} + (R_i - 1)T_{\text{HD}}^{\text{fail}}] \\
 X_{\text{PR}_i} &= \begin{cases} \Phi_{\text{PR}_i} \lambda_i T_{\text{PR}}^{\text{suc}} & (\text{asynch.}) \\ \Phi_{\text{PR}_i} \lambda_i [T_{\text{PR}}^{\text{suc}} + (R_i - 1)T_{\text{PR}}^{\text{fail}}] & (\text{synch.}) \end{cases} \\
 X_{\text{SC}_i} &= \Phi_{\text{SC}_i} \lambda_i [T_{\text{SC}}^{\text{suc}} + (R_i - 1)T_{\text{SC}}^{\text{fail}}] \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

と表せる。これら 3 つの送信エアタイムはそれぞれ重複しない期間なため, 端末 i の合計の送信エアタイム X_i は

$$X_i = X_{\text{HD}_i} + X_{\text{PR}_i} + X_{\text{SC}_i} \quad (3.4)$$

と表せる. 式 (3.2), (3.4) から d_i^{suc} 及び d_i^{fail} はそれぞれ

$$\begin{aligned} d_i^{\text{suc}} &= \Phi_{\text{HD}_i} T_{\text{HD}}^{\text{suc}} + \Phi_{\text{PR}_i} T_{\text{PR}}^{\text{suc}} + \Phi_{\text{SC}_i} T_{\text{SC}}^{\text{suc}} \\ d_i^{\text{fail}} &= \begin{cases} \Phi_{\text{HD}_i} T_{\text{HD}}^{\text{fail}} + \Phi_{\text{SC}_i} T_{\text{SC}}^{\text{fail}} & (\text{asynch.}) \\ \Phi_{\text{HD}_i} T_{\text{HD}}^{\text{fail}} + \Phi_{\text{PR}_i} T_{\text{PR}}^{\text{fail}} + \Phi_{\text{SC}_i} T_{\text{SC}}^{\text{fail}} & (\text{synch.}) \end{cases} \end{aligned} \quad (3.5)$$

と表せる. 式 (3.5) より, d_i^{suc} 及び d_i^{fail} はそれぞれ端末 i の HD, PR, SC 送信時に 1 フレーム処理したときにおける成功時間及び失敗時間の期待値として表すことができる.

3.2.2 Φ_{HD_i} , Φ_{PR_i} , 及び Φ_{SC_i} の表現

本節では, 式 (3.5) において送信エアタイムの表現に用いた Φ_{HD_i} , Φ_{PR_i} , 及び Φ_{SC_i} の導出を行う. 本研究で対象としている無線全二重通信マルチホップネットワークでは, バックオフタイマを 0 にした端末の送信をきっかけとして, その受信端末が SC 送信を行う. この SC 送信はバックオフタイマの値によらず送信を開始する. 受信端末がデータフレームを所持していない場合は, SC 送信は開始されないため, PR 送信端末は実質半二重通信によってデータを送信する. ここで, 端末 i の合計送信回数に対する HD 送信と PR 送信回数の和を Δ_i と定義すると, Φ_{HD_i} , Φ_{PR_i} , Φ_{SC_i} は次式を満たす.

$$\begin{aligned} \Delta_i &= \Phi_{\text{HD}_i} + \Phi_{\text{PR}_i} \\ 1 - \Delta_i &= \Phi_{\text{SC}_i} \end{aligned} \quad (3.6)$$

定義より, Δ_i は端末 i の合計の送信回数に対するバックオフタイマが 0 のときの送信回数の比として表すことができる. したがって, 図 3.3 に示すような FD MAC

の動作を考慮したマルコフ連鎖モデルを用いて、端末の送信確率に対するバックオフタイマが0のときの送信確率の割合として Δ_i を導出する。図 3.3 において、状態 $(s, k)_i$ は端末 i が s 番目のバックオフステージにおけるバックオフタイマの値が k であることを示している。また状態 $(s, k)_i$ において、端末 i は $s \in [0, m], k \in [0, W_s - 1]$ のときに“バックオフカウント状態”であり、 $s \in [0, m], k = -1$ のときに“送信状態”であると定義する。この送信状態は HD, PR, 及び SC 送信の全てを含む。SC 送信を行う端末はバックオフタイマが0でなくても送信可能であるため、図 3.3 内の SC 送信に関する遷移確率は端末 i のセカンダリ送信確率 β_i を用いて

$$P\{s, -1 \mid s, k\} = \beta_i, \quad k \in [1, W_s - 1] \quad (3.7)$$

と表せる。また、DCF に基づく指数バックオフの動作とバックオフタイマのカウントに関する遷移確率は

$$\begin{aligned} P\{s, k - 1 \mid s, k\} &= 1 - \beta_i, \quad k \in [1, W_s - 1] \\ P\{s, -1 \mid s, 0\} &= 1, \\ P\{0, k \mid s, -1\} &= \frac{1 - \gamma_i}{W_0}, \quad k \in [0, W_0 - 1] \\ P\{s, k \mid s - 1, -1\} &= \frac{\gamma_i}{W_s}, \quad k \in [0, W_s - 1] \\ P\{0, k \mid m, -1\} &= \frac{1 - \gamma_i}{W_0}, \quad k \in [0, W_0 - 1] \end{aligned} \quad (3.8)$$

となる。ここで、状態 $(s, k)_i$ における定常状態確率を $\pi_{(s, k)_i}$ と定義すると、式 (3.7) 及び (3.8) より $\pi_{(s, k)_i}$ は

$$\pi_{(s, k)_i} = w_{(s, k)_i} \gamma_i \pi_{(s-1, -1)_i} \quad (3.9)$$

の関係を満たす。ただし、 $w_{(s, k)_i}$ は

$$w_{(s, k)_i} = \frac{1 - (1 - \beta_i)^{W_s - k}}{W_s \beta_i} \quad (3.10)$$

である。またマルコフ連鎖モデルにおいて、状態 $(s-1, -1)$ から確率 γ_i で遷移する全ての矢印はバックオフカウント状態を通して $(s, -1)$ へ到達するため、定常状態確率 $\pi_{(s-1, -1)_i}$ 及び $\pi_{(s, -1)_i}$ は

$$\begin{aligned}\pi_{(s, -1)_i} &= \gamma_i \pi_{(s-1, -1)_i}, & s \in [1, m-1] \\ \pi_{(m, -1)_i} &= \frac{\gamma_i}{1 - \gamma_i} \pi_{(m-1, -1)_i}\end{aligned}\tag{3.11}$$

の関係を満たす。マルコフ連鎖モデルに示される全ての定常状態確率の和は必ず1となることから、式 (3.9), (3.11) を用いると、

$$\begin{aligned}\sum_{s=0}^m \sum_{k=-1}^{W_s-1} \pi_{(s, k)_i} &= \sum_{s=0}^m \pi_{(s, -1)_i} + \sum_{s=0}^m \sum_{k=0}^{W_s-1} \pi_{(s, k)_i} \\ &= \frac{\pi_{(0, -1)_i}}{1 - \gamma_i} + \sum_{s=0}^m \sum_{k=0}^{W_s-1} w_{(s, k)_i} \gamma_i^s \pi_{(0, -1)_i} \\ &= 1\end{aligned}\tag{3.12}$$

の関係が得られる。式 (3.12) より、状態 $(0, -1)$ における定常状態確率 $\pi_{(0, -1)_i}$ は

$$\pi_{(0, -1)_i} = \frac{1}{\frac{1}{1 - \gamma_i} + \sum_{s=0}^m \sum_{k=0}^{W_s-1} w_{(s, k)_i} \gamma_i^s}\tag{3.13}$$

と表せる。式 (3.10), (3.13) を式 (3.9) 及び式 (3.11) に代入することで、状態 $(s, k)_i, s \in [0, m], k \in [-1, W_s - 1]$ における定常状態確率 $\pi_{(s, k)_i}$ は送信失敗確率 γ_i と SC 送信確率 β_i の関数として表される。

マルコフ連鎖モデルにおいて、状態 $(s, 0)_i, s \in [0, m]$ は端末 i のバックオフステージが s のときにバックオフタイマが0であることを意味している。したがって、合計の送信回数に対するバックオフタイマが0のときの送信回数の割合である Δ_i は、状態 $(s, -1)_i, s \in [0, m]$ のときの定常状態確率の和に対する状態 $(s, 0)_i, s \in [0, m]$ のと

きの定常状態確率の和として表すことができ,

$$\Delta_i = \frac{\sum_{s=0}^m \pi_{(s,0)_i}}{\sum_{s=0}^m \pi_{(s,-1)_i}} = \sum_{s=0}^m w_{(s,0)_i} \gamma_i^s (1 - \gamma_i) \quad (3.14)$$

となる. 式 (3.6), (3.14) より, 端末 i の合計の送信回数に対する SC 送信回数の割合である Φ_{SC_i} は送信失敗確率 γ_i とセカンダリ送信確率 β_i を用いると

$$\begin{aligned} \Phi_{SC_i} &= 1 - \sum_{s=0}^m w_{(s,0)_i} \gamma_i^s (1 - \gamma_i) \\ &= 1 - \sum_{s=0}^m \frac{1 - (1 - \beta_i)^{W_s}}{W_s \beta_i} \gamma_i^s (1 - \gamma_i) \end{aligned} \quad (3.15)$$

のように表される.

ここで, 端末 i の HD 送信回数と PR 送信回数の合計に対する HD 送信回数の割合を Ω_i と定義すると, Φ_{HD_i} , Φ_{PR_i} , 及び Ω_i は

$$\begin{aligned} \Omega_i &= \frac{\Phi_{HD_i}}{\Phi_{HD_i} + \Phi_{PR_i}} = \frac{\Delta_i}{\Delta_i + \Phi_{PR_i}} \\ 1 - \Omega_i &= \frac{\Phi_{PR_i}}{\Phi_{HD_i} + \Phi_{PR_i}} = \frac{\Phi_{PR_i}}{\Delta_i} \end{aligned} \quad (3.16)$$

の関係を満たす. 2.2.2 節で言及した無線全二重通信マルチホップネットワークの特徴から, 端末 i の PR 送信が成功するときに端末 $i+1$ は SC 送信を行う. つまり, 端末 i の PR 送信成功回数と端末 $i+1$ の SC 送信回数は等しい [9]. これより Ω_i を用いると

$$\Delta_i (1 - \Omega_i) \lambda_i = (1 - \Delta_{i+1}) \lambda_{i+1} R_{i+1} \quad (3.17)$$

の関係が得られる. 式 (3.17) より, Ω_i は

$$\Omega_i = 1 - \frac{(1 - \Delta_{i+1}) \lambda_{i+1} R_{i+1}}{\Delta_i \lambda_i} \quad (3.18)$$

となる. 式 (3.18) を式 (3.16) に代入することで, Φ_{HD_i} 及び Φ_{PR_i} はそれぞれ

$$\Phi_{\text{HD}_i} = \Delta_i - \frac{(1 - \Delta_{i+1})\lambda_{i+1}R_{i+1}}{\lambda_i} \quad (3.19)$$

$$\Phi_{\text{PR}_i} = \frac{(1 - \Delta_{i+1})\lambda_{i+1}R_{i+1}}{\lambda_i} \quad (3.20)$$

と表せる. 式 (3.19), (3.20) より, Φ_{HD_i} 及び Φ_{PR_i} は Φ_{SC_i} と同様に送信失敗確率と SC 送信確率で表すことができる.

3.3 キャリアセンスエアタイム

キャリアセンスエアタイムはチャネルビジーを検知する確率である. マルチホップネットワークでは, 端末配置によりキャリアセンスエアタイムが異なる. そのため, エアタイムの解析では, 端末ごとにキャリアセンスエアタイムが定義される. この各端末のキャリアセンスエアタイムは, キャリアセンス範囲内に存在する端末の送信エアタイムの和で表すことができる [5]-[9], [30]. 3.1.1 節に示す仮定 3 より, 端末 i のキャリアセンスエアタイムは端末 $i-1$ と端末 $i+1$ の送信エアタイムの和で表現することができる. ただし, 端末 $i-1$ と端末 $i+1$ の送信が重複する期間が存在するため, その重複期間を取り除く必要がある. また同期型 FD MAC の場合, 端末 $i-2$ 及び端末 $i+1$ がデータ送信する際に端末 $i-1$ 及び端末 $i+1$ が送信する制御フレームを検知するため, それによって設定される NAV による待機時間も考慮する必要がある. そのため, 導出するキャリアセンスエアタイムには周囲の端末の送信期間に加えて NAV による待機時間も含まれる.

端末 i のキャリアセンスエアタイムは 2 つに分けて導出する. 1 つ目は端末 $i-1$ 及び端末 $i+1$ による送信を検知することによるキャリアセンスエアタイムであり,

これを $\Psi_i^{(1)}$ と定義する. 2つ目は端末 $i-2$ のデータ送信中に設定する NAV によるキャリアセンスエアタイムであり, これを $\Psi_i^{(2)}$ と定義する. なお非同期型 FD MAC では NAV の設定を行わないため, $\Psi_i^{(2)}$ は常に 0 である. 以下, それぞれの FD MAC に対して $\Psi_i^{(1)}$ 及び $\Psi_i^{(2)}$ を導出する.

端末 i ($i+1$) が SC 送信端末となりフレームを送信するとき, 端末 $i-1$ (i) は PR 送信端末としてフレームを送信する. つまり, 端末 i または端末 $i+1$ が SC 送信をしている間は端末 i が送信中なため, 端末 i のキャリアセンスエアタイムとしてカウントしない. また, 端末 $i-1$ と端末 $i+1$ が同時にフレームを送信すると両端末の送信が重複する [6], [7], [30]. ただし, 端末 $i-1$ 及び端末 $i+1$ は端末 i のフレーム送信中に送信開始できないため, 両端末の送信は端末 i が送信中でないときに重複する [8], [9]. 以上より, 端末 $i-1$ 及び端末 $i+1$ の重複した送信時間を取り除くことで, 非同期型 FD MAC における $\Psi_i^{(1)}$ は

$$\begin{aligned} \Psi_i^{(1)} = & (X_{i-1} - X_{SC_i}) + (X_{i+1} - X_{SC_{i+1}}) \\ & - \frac{(X_{i-1} - X_{SC_i})(X_{i+1} - X_{SC_{i+1}})}{1 - X_i} \quad (\text{asynch.}) \end{aligned} \quad (3.21)$$

と表せる.

同期型 FD MAC の場合, 端末 $i-1$ 及び端末 $i+1$ の送信期間に加えて, 端末 $i+1$ の送信によって設定される NAV の期間を考慮する必要がある. 2.1.2 節で言及したように, 端末 i は端末 $i+1$ が送信した RTS を受信すると NAV を設定し, 端末 $i+1$ が送信終了するまで待機する. ただし, この待機期間は端末 $i+1$ が RTS を再送するたびに更新されるため, 端末 i は端末 $i+1$ のデータ送信が成功するまで NAV を維持する. つまり, この NAV による待機時間は端末 $i+1$ の送信期間と, 端末 $i+1$ が RTS を再送信することで更新される NAV の期間の和と考えられる. NAV の更新による待機期間は端末 $i+1$ が送信失敗してから RTS を再送信するまでの期間である.

よって、この更新による待機時間は端末 $i+1$ の再送に要するバックオフカウント期間の和で表すことができる。ここで、端末 i のデータ送信成功にかかる平均バックオフカウント期間を U_i と定義する。 U_i はマルコフ連鎖モデルにおいて状態 $(0, -1)$ に戻るまでの再帰時間として表すことができる [9]。これは $\pi_{(0,-1)_i}$ の逆数として表されるため

$$U_i = \frac{1}{\pi_{(0,-1)_i}} = \frac{1}{1 - \gamma_i} + \sum_{s=0}^m \sum_{k=0}^{W_s} w_{(s,k)_i} \gamma_i^s \quad (3.22)$$

となる。 U_i を用いると、NAV による更新期間を考慮した $\Psi_i^{(1)}$ は

$$\begin{aligned} \Psi_i^{(1)} = & (X_{i-1} - X_{SC_i}) + (X_{i+1} - X_{SC_{i+1}} \\ & + \lambda_{i+1}(U_{i+1} - \frac{CW_{\min}}{2})\sigma) \end{aligned} \quad (\text{synch.}) \quad (3.23)$$

と表すことができる。ここで、 σ はシステムスロット期間である。なお同期型 FD MAC では、端末 $i-1$ と端末 $i+1$ の RTS フレームの送信が重複する期間がデータフレームの送信期間に比べて十分に短いため、この重複期間を 0 として表現する。

次に $\Psi_i^{(2)}$ について導出する。すでに言及したように、非同期型 FD MAC では NAV の設定を行わないため、 $\Psi_i^{(2)} = 0$ となる。一方同期型 FD MAC では、端末 i は端末 $i-1$ が HD 送信または SC 送信を正常に受信した後、FCTS フレームを送信した際に NAV を設定する。つまり、端末 i は端末 $i-2$ が HD 送信または SC 送信に成功するときに NAV を設定する。この場合に設定される NAV 期間はデータフレームの送信期間と等しいため、 $\Psi_i^{(2)}$ は

$$\Psi_i^{(2)} = \lambda_{i-2}(\Phi_{HD_{i-2}} + \Phi_{SC_{i-2}})DATA \quad (\text{synch.}) \quad (3.24)$$

と表せる。以上より、端末 i のキャリアセンスエアタイムは

$$Y_i = \Psi_i^{(1)} + \Psi_i^{(2)} \quad (3.25)$$

と表せる。

3.4 フレーム保持確率

3.1.1 節に示す仮定1より, 中継端末のフレーム到着率 λ_i は端末0のフレーム到着率と等しい. つまり, λ_i は

$$\frac{O}{P} = \lambda_0 = \lambda_1 = \cdots = \lambda_{H-1} \quad (3.26)$$

を満たす. ここで, O はネットワークのオフアードロードである. 端末 i のフレーム保持確率は端末 i がアイドル状態において少なくとも1つフレームを持つ確率として定義される [7]. この確率は端末 i がアイドル状態の期間に対するバックオフタイムカウント期間の割合として表現できる. アイドル状態の期間を表すアイドルエアタイム Z_i は

$$Z_i = 1 - X_i - Y_i. \quad (3.27)$$

と表せる. したがって, 端末 i のフレーム保持確率 q_i は

$$q_i = \min\left(\frac{\lambda_i U_i \sigma}{Z_i}, 1\right) = \min\left(\frac{\lambda_i U_i \sigma}{1 - X_i - Y_i}, 1\right) \quad (3.28)$$

と表せる. q_i が1のとき, 端末 i は常に1つ以上のフレームを所持している. これは端末 i がネットワーク内のボトルネック端末であることを意味する. つまり, ネットワークの最大スループットはボトルネック端末のフレーム保持確率が1となるときに導出できる [7], [30].

3.5 送信失敗確率

直線状マルチホップネットワークにおいて, 隠れ端末によるフレーム衝突は端末 i と端末 $i+2$ の間で起こる. エアタイムの解析表現において, 隠れ端末による衝突

は2つに分類される。1つ目は「protocol hidden node collision」と呼ばれ、2つ目は「physical hidden node collision」と呼ばれる [6],[30]。

protocol hidden node collision は端末 $i+2$ がフレームを送信、または端末 $i+1$ が NAV を設定している間に端末 i がフレームを送信すると起こる。端末 $i+1$ の PR 送信中に端末 i は送信を開始しないため、端末 i の送信が衝突するのは端末 $i+2$ が HD 送信または PR 送信をしている時である。ただし、端末 $i+1$ が送信している間は端末 i 及び端末 $i+2$ はフレームを送信できない。非同期型 FD MAC では、端末 i のデータ送信は端末 $i+2$ のデータ送信と衝突する [8], [9]。したがって、protocol hidden node collision による送信失敗確率 $\gamma_i^{(1)}$ は

$$\gamma_i^{(1)} = \frac{a_{\text{HD}}X_{\text{HD}_{i+2}} + a_{\text{PR}}X_{\text{PR}_{i+2}}}{1 - X_{i+1}} \quad (\text{asynch.}) \quad (3.29)$$

と表せる。ここで、 $a_{\text{HD}} = \text{DATA}/T_{\text{HD}}^{\text{suc}}$, $a_{\text{PR}} = \text{DATA}/T_{\text{PR}}^{\text{suc}}$ である。

一方同期型 FD MAC では、端末 $i+2$ のフレーム送信中に加えて端末 $i+1$ の NAV 設定中に端末 i がフレームを送信することによる送信失敗を考慮する必要がある。これらの期間の和は端末 $i+1$ の NAV による待機時間と等しい。3.3 節で言及したように、端末 $i+1$ の NAV による待機期間は端末 $i+2$ のフレーム送信期間と端末 $i+2$ の再送に要するバックオフカウント期間の和で表せる。この待機期間中に端末 i が RTS フレームを送信すると失敗するため、protocol hidden node collision による送信失敗確率 $\gamma_i^{(1)}$ は

$$\gamma_i^{(1)} = \frac{X_{\text{HD}_{i+2}} + X_{\text{PR}_{i+2}} + \lambda_{i+2}(U_{i+2} - \frac{CW_{\min}}{2})\sigma}{1 - X_{i+1}} \quad (\text{synch.}) \quad (3.30)$$

と表せる。

次に physical hidden node collision について説明する。この衝突は端末 i がフレームを送信している間に端末 $i+2$ がフレームを送信すると起こる。つまり、端末 i が

送信するときに端末 $i+2$ のバックオフタイマの値が端末 i のフレーム送信期間より短い場合にこの衝突が起こる [30]. protocol hidden node collision で言及したように, 端末 $i+1$ のフレーム送信中に端末 i と端末 $i+2$ はフレームを送信することができない. また, 端末 $i+2$ がすでに送信中である場合はこの衝突は起こらない [9]. したがって, 端末 $i+1$ が PR 送信中に端末 $i+2$ が SC 送信をしていることを考慮すると, physical hidden node collision による送信失敗確率は同期型 FD MAC 及び非同期型 FD MAC とともに

$$\gamma_i^{(2)} = \frac{q_{i+2} Z_{i+2} \sum_{s=0}^m \sum_{k=0}^{\min(f, Ws)} \pi_{(s,k)_{i+2}}}{1 - X_{i+1} - X_{\text{HD}_{i+2}} - X_{\text{PR}_{i+2}}} \quad (3.31)$$

と表せる. ここで, 非同期型 FD MAC では $f = \text{DATA}/\sigma$ であり, 同期型 FD MAC では RTS/σ である.

これらの送信失敗確率は独立しているため, 端末 i の送信失敗確率は

$$\gamma_i = \gamma_i^{(1)} + \gamma_i^{(2)} \quad (3.32)$$

となる.

3.6 セカンダリ送信確率

端末 i の SC 送信はバックオフタイマカウント中に端末 $i-1$ のデータフレームのヘッダ部分を受信成功したとき, またはバックオフタイマカウント中に端末 $i-1$ の RTS フレームを受信成功したときに行われる. 文献 [9] より, 端末 i がバックオフタイマカウント中であっても端末 $i-1$ がデータフレームを持っていないときは SC 送信を行わない. この場合におけるセカンダリ送信を行わない確率は $(1 - q_{i-1})q_i Z_i$ で表される. また, 端末 $i-1$ が端末 $i-2$ の送信を検知しているときも端末 i は SC 送

信を行わない。この場合における SC 送信を行わない確率は $(X_{\text{HD}_{i-2}} + X_{\text{SC}_{i-2}})q_i Z_i$ で表される。ここで、端末 i がバックオフタイマの値が 0 のときに送信を行う確率を τ_i とすると、端末 i の SC 送信確率は

$$\begin{aligned}\beta_i &= \frac{q_i Z_i - (1 - q_{i-1}) Z_{i-1} q_i Z_i - (X_{\text{HD}_{i-2}} + X_{\text{SC}_{i-2}}) q_i Z_i}{q_i Z_i} \tau_{i-1} \\ &= [1 - (1 - q_{i-1}) Z_{i-1} - X_{\text{HD}_{i-2}} - X_{\text{SC}_{i-2}}] \tau_{i-1}\end{aligned}\quad (3.33)$$

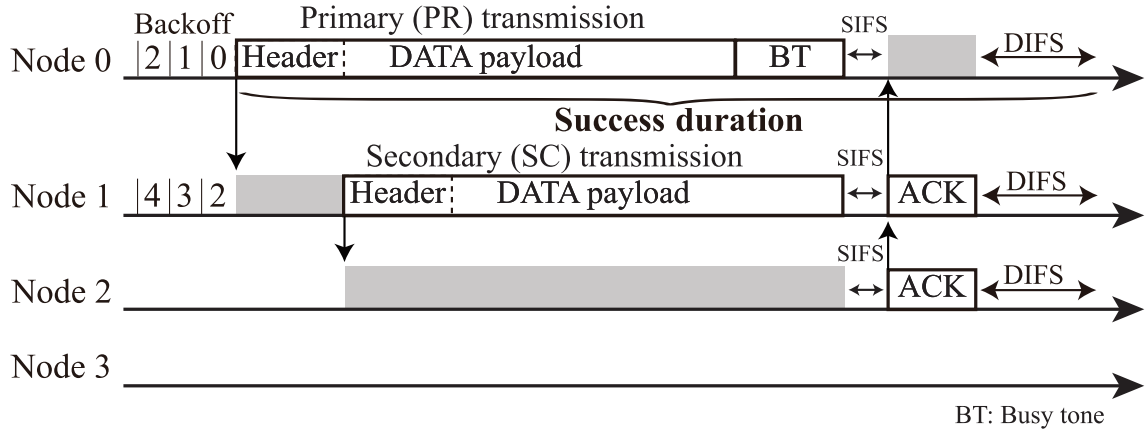
と表せる。ただし、 τ_i はバックオフタイマが 0 のときの定常状態確率の和で表され

$$\tau_{i-1} = \sum_{s=0}^m \pi_{(s,0)_{i-1}} \quad (3.34)$$

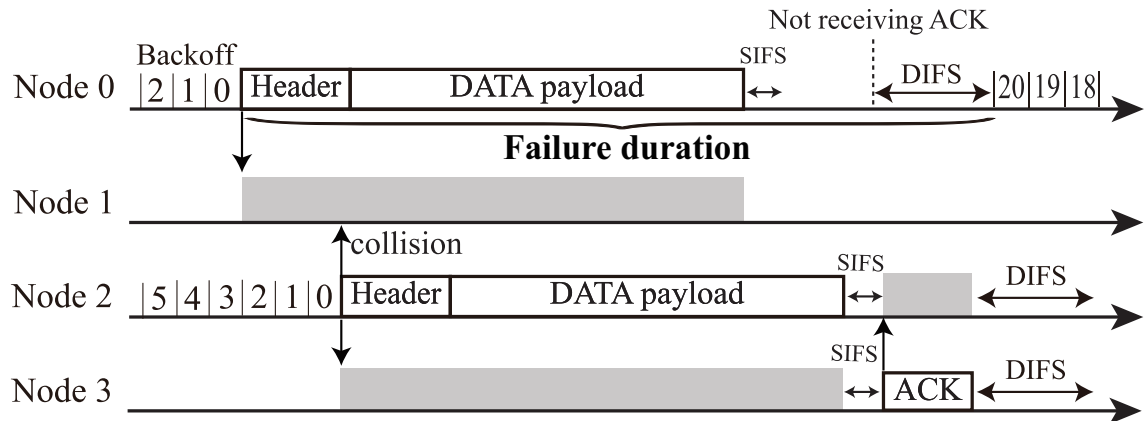
となる。

3.7 エンドツーエンドスループット

式 (3.4), (3.14), (3.18), (3.28), (3.32), (3.33) から、 $6H$ 個の代数方程式が得られる。これらの方程式には $6H$ 個の未知数 $X_i, \Delta_i, \Omega_i, q_i, \gamma_i, \beta_i$ ($i = 0, 1, 2, \dots, H-1$) が含まれており、オフロード O を与えることで解くことができる。本論文では、ニュートン法を用いて $6H$ 個の未知数を導出する。エンドツーエンドの最大スループットは $q_i = 1$ を満たす端末が現れたときの O の値として得られる。全端末が $q_i < 1$ の場合、エンドツーエンドのスループットは O と等しい。同期型及び非同期型 FD MAC を適用したときのエンドツーエンドスループットは、5 種類のパラメータ (送信成功時間, 送信失敗時間, 送信エアタイム X_i , キャリアセンスエアタイム Y_i , 送信失敗確率 γ_i) を切り替えることで導出できる。



(a) 送信成功



(b) 送信失敗

図 3.1: 解析対象ネットワークにおける非同期型 FD MAC のチャネルアクセス例

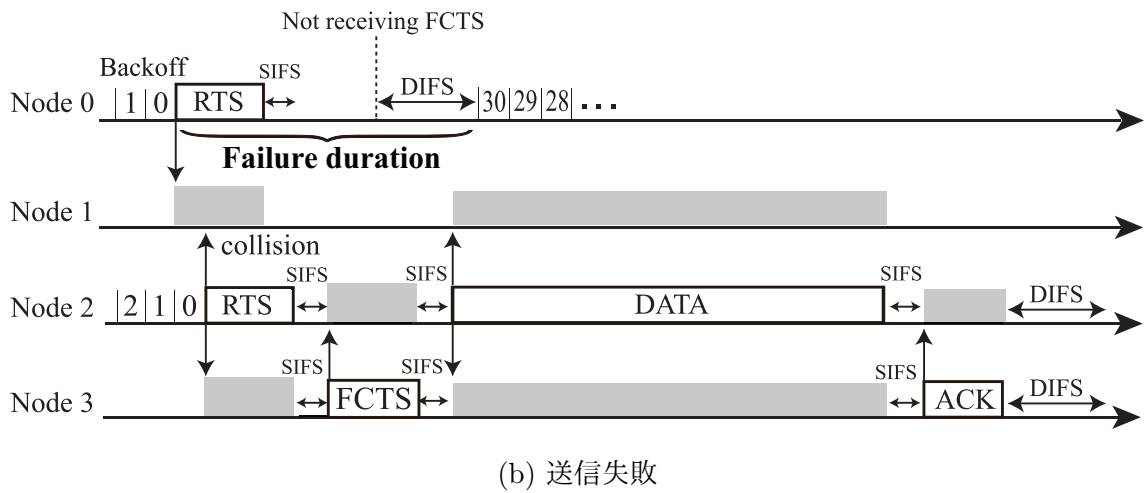
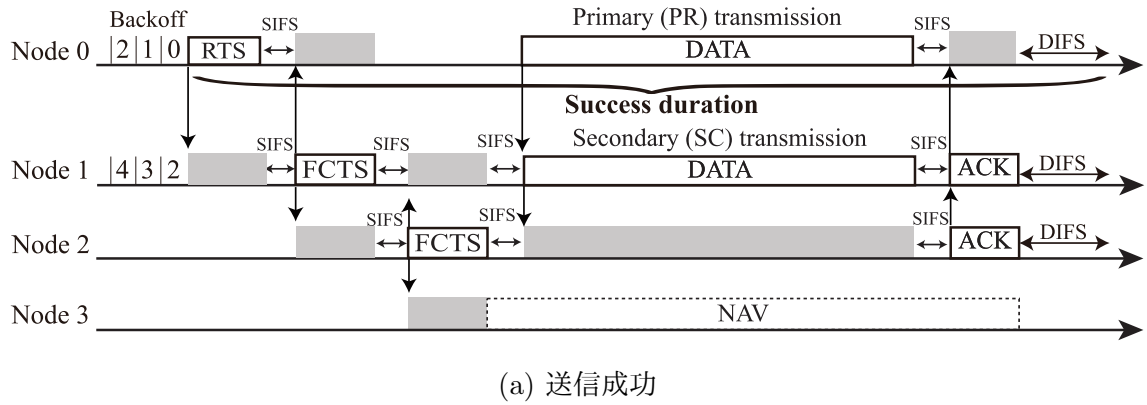


図 3.2: 解析対象ネットワークにおける同期型 FD MAC のチャネルアクセス例

表 3.1: HD, PR, SC 送信時における送信成功時間及び送信失敗時間

	Asynch. FD MAC
$T_{\text{HD}}^{\text{suc}}$	$DIFS + DATA + SIFS + ACK$
$T_{\text{HD}}^{\text{fail}}$	$DIFS + DATA + SIFS + ACK$
$T_{\text{PR}}^{\text{suc}}$	$DIFS + HEADER + DATA + SIFS + ACK$
$T_{\text{PR}}^{\text{fail}}$	-
$T_{\text{SC}}^{\text{suc}}$	$DIFS + DATA + SIFS + ACK$
$T_{\text{SC}}^{\text{fail}}$	$DIFS + DATA + SIFS + ACK$
	Synch. FD MAC
$T_{\text{HD}}^{\text{suc}}$	$DIFS + RTS + 3 \cdot SIFS + FCTS + DATA + ACK$
$T_{\text{HD}}^{\text{fail}}$	$DIFS + RTS + SIFS + FCTS$
$T_{\text{PR}}^{\text{suc}}$	$DIFS + RTS + 4 \cdot SIFS + 2 \cdot FCTS + DATA + ACK$
$T_{\text{PR}}^{\text{fail}}$	$DIFS + RTS + SIFS + FCTS$
$T_{\text{SC}}^{\text{suc}}$	$DIFS + 4 \cdot SIFS + 2 \cdot FCTS + DATA + ACK$
$T_{\text{SC}}^{\text{fail}}$	$DIFS + 2 \cdot SIFS + 2 \cdot FCTS$

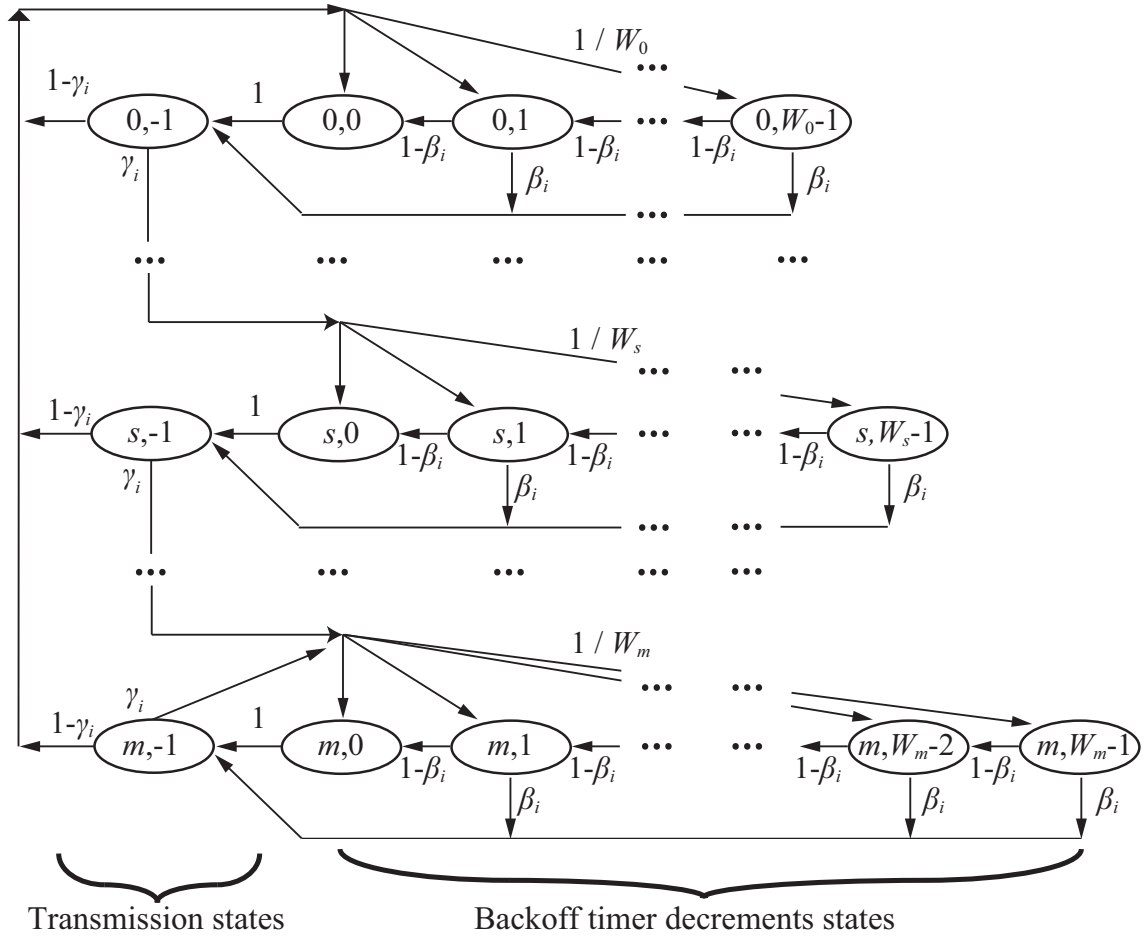


図 3.3: 本論文で用いたマルコフ連鎖モデル

第4章

解析モデルの評価と FD MACの性能解析

本章では, 計算機シミュレーション結果との比較より理論解析モデルの妥当性を確認する. また得られた結果からマルチホップネットワークにおいて同期型及び非同期型 FD MAC を適用したときの性能の優位性について議論する. 4.1 節ではネットワークスループットを評価し理論解析モデルの妥当性を確認する. 4.2 節ではネットワークの最大スループットという観点で同期型及び非同期型 FD MAC を適用したときの性能について考察する.

4.1 解析モデルの評価

表 4.1 に, 解析モデルの評価に用いたシステムパラメータを示す. これらのパラメータは IEEE 802.11a に準じている.

4.1.1 エンドツーエンドスループット特性

まず, ネットワークの最大スループットを得るためにフレーム保持確率 q を確認する. 図 4.1 及び図 4.2 に同期型 FD MAC 及び非同期型 FD MAC を適用したときの

オフアードロードに対するフレーム保持確率を示す。図4.1及び図4.2から、各端末のフレーム保持確率は他の端末と異なる値を持つことが確認できる。これは端末ごとに異なる送信失敗確率、キャリアセンス、SC送信の影響を受けるからである。これらのグラフから、解析結果はシミュレーション結果と定性的な一致が確認できる。よって、提案した解析モデルは端末ごとの送信失敗確率、キャリアセンス、SC送信による影響を考慮したフレーム保持確率を表現できていることがわかる。また図4.1及び図4.2の解析結果から、同期型及び非同期型FD MAC適用時においてオフアードロードがそれぞれ3.27[Mbps]及び5.47[Mbps]のときに端末0のフレーム保持確率が1となり、他の端末のフレーム保持確率は1より低いことが確認できる。これより、両FD MACを適用した場合においても、ネットワークのオフアードロードはデータ生成端末である端末0であることがわかる。

次に図4.3に同期型及び非同期型FD MACを適用したときのオフアードロードに対するエンドツーエンドのスループットを示す。図4.3より、解析から得られる同期型及び非同期型FD MAC適用時のエンドツーエンドの最大スループットはそれぞれ3.27[Mbps]及び5.47[Mbps]である。これらの値はシミュレーション結果と一致していることが確認できる。したがって、図4.1、4.2、及び図4.3から、同期型および非同期型FD MACに関して、オフアードロードの設定値に関わらず提案した解析モデルの妥当性が確認できる。

4.1.2 最大エンドツーエンドスループット特性

次に飽和状態における同期型及び非同期型FD MACを適用したときの解析結果の妥当性について評価する。なお、飽和状態とはネットワーク内に存在するボトルネットワーク端末のフレーム保持確率が1となった状態としている。図4.4に同期型FD MACお

よび非同期型FD MACを適用したときの、ネットワークのホップ数 H に対するエンドツーエンドの最大スループットを示す。ここで、データペイロード長は500[bytes]と設定している。図4.4から、ホップ数によらず解析結果とシミュレーション結果に定性的な一致が見られることが確認できる。図4.5に同期型FD MACおよび非同期型FD MACを適用した5ホップネットワークにおける、データペイロード長に対するエンドツーエンドの最大スループットを示す。図4.5から、データのペイロード長によらず解析結果とシミュレーション結果に定性的な一致が見られることが確認できる。図4.4及び図4.5から、非同期型FD MACにおける最大スループットが常に同期型FD MACの場合より高いことが確認できる。これは本研究における新たな知見の一つである。

ここで、図4.5内の同期型FD MACを適用した結果において、データペイロード長が長くなるにつれて解析とシミュレーションの結果に誤差が生じる理由について説明する。これは提案した解析モデルにおいて送信失敗確率 γ がバックオフステージ数(再送回数)によらず一定の値と仮定しているためである。図4.6に誤差の原因となる送信失敗例を示す。端末0は端末1がNAVを設定していてもRTSフレームを送信できる。このNAVの期間はデータペイロード長 P に依存しており、 P が大きいほどNAVの期間が長くなる。しかし送信失敗期間は P に依存しないため、ペイロード長を長く設定するほど、端末0は端末1のNAV設定中にRTSフレームの送信失敗を繰り返しやすくなる。解析では、この送信失敗の確率をすべてのバックオフステージで平均化しているため、繰り返し起こる送信失敗が考慮されていない。この結果 P が大きいとき、同期型FD MACにおける最大スループットの解析結果はシミュレーション結果より高くなると考えられる。

4.2 FD MAC の性能解析

無線全二重 WLAN においては、データペイロード長が長い場合は同期型 FD MAC を適用したほうが高いスループットを得られることが言及されている [27]. しかし図 4.5 から、マルチホップネットワークではペイロード長にかかわらず常に非同期型 FD MAC 適用時の結果が優れていることが確認できる. これはマルチホップネットワークにおいて制御フレームの交換が適していないことを示唆している. 同期型 FD MAC を適用したマルチホップネットワークでは端末が RTS フレームを送信すると、その周囲にいる端末は NAV を設定する. この結果、3.3 節及び 3.5 節で言及したように、RTS フレーム送信端末が制御フレームの交換に失敗しデータを送信しなくても、NAV を設定した端末はフレームの送信が禁止されたままとなる. このような動作の結果として、ネットワーク内の端末の送信機会が減少する. 提案した解析モデルにおいて、この NAV による影響はキャリアセンスエアタイム及び送信失敗確率 (式 (3.23) 及び式 (3.30)) で考慮されている.

ここで、図 4.7 及び図 4.8 に同期型 FD MAC および非同期型 FD MAC を適用したときの、オフロードに対する各端末のキャリアセンスエアタイム及び送信失敗確率の解析結果を示す. 図 4.7 より、ボトルネック端末 0 の送信失敗確率が非同期型 FD MAC に比べて高いことがわかる. また図 4.8 より、ボトルネック端末の中継先である端末 1 のキャリアセンスエアタイムについても同期型 FD MAC のほうが高いことがわかる. これらの結果から、ネットワーク内でボトルネックとなっている 1 ホップ目の通信頻度は同期型 FD MAC のほうが少なくなると考察できる. この考察は先ほど言及した NAV の影響による送信機会の減少理由と一致するため、NAV による動作は非同期型 FD MAC の結果が同期型 FD MAC の場合より常に優れている理由として適切だと判断できる. したがって、マルチホップネットワークにおいて無

線全二重通信を行う際は非同期型FD MACを適用することがネットワークの性能向上につながる事がわかる。

以上より、調査した環境下で動作するアプリケーションにおいては非同期型FD MACの性能が優れており、無線全二重通信マルチホップネットワークにおいては非同期型FD MACが適したMACプロトコルであると考察できる。

表 4.1: シミュレーションにおける IEEE 802.11a パラメータ諸元

PLCP Preamble	16 [μ sec]
PLCP header	4 [μ sec]
MAC header	24 [μ sec]
LLC header	8 [μ sec]
Data rate	54 [Mbps]
ACK bit rate	12 [Mbps]
Control bit rate	6 [Mbps]
Distance of each node	45 [m]
Transmission range	60 [m]
Carrier sensing range	60 [m]
HEADER	28 [μ sec]
RTS	48 [μ sec]
FCTS	48 [μ sec]
ACK	32 [μ sec]
SIFS	16 [μ sec]
DIFS	34 [μ sec]
slot time	9 [μ sec]
CW_{\min}	16
CW_{\max}	1024
Retransmission limit	7

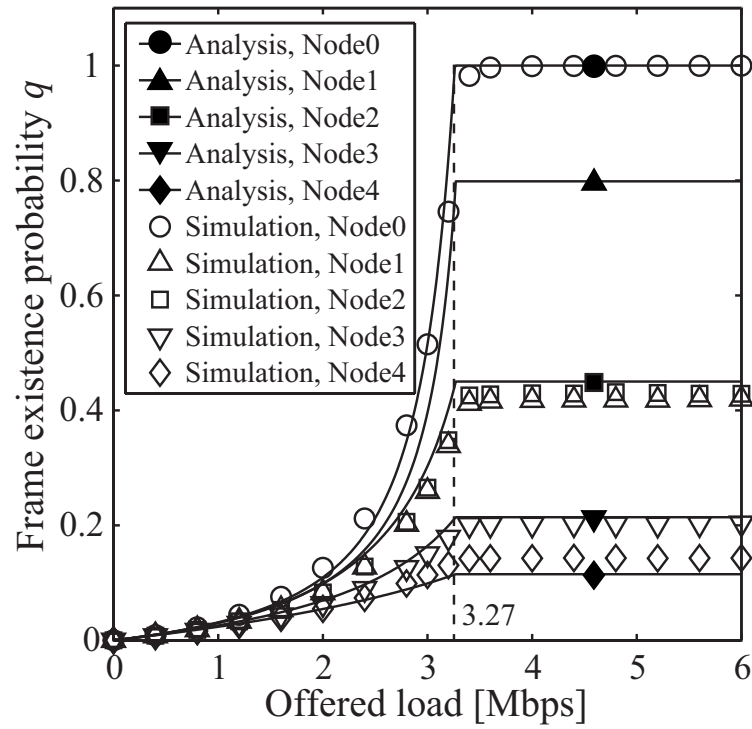


図 4.1: 同期型 FD MAC を適用した 5 ホップネットワークにおけるフレーム保持確率特性 (ペイロード長: 500[bytes])

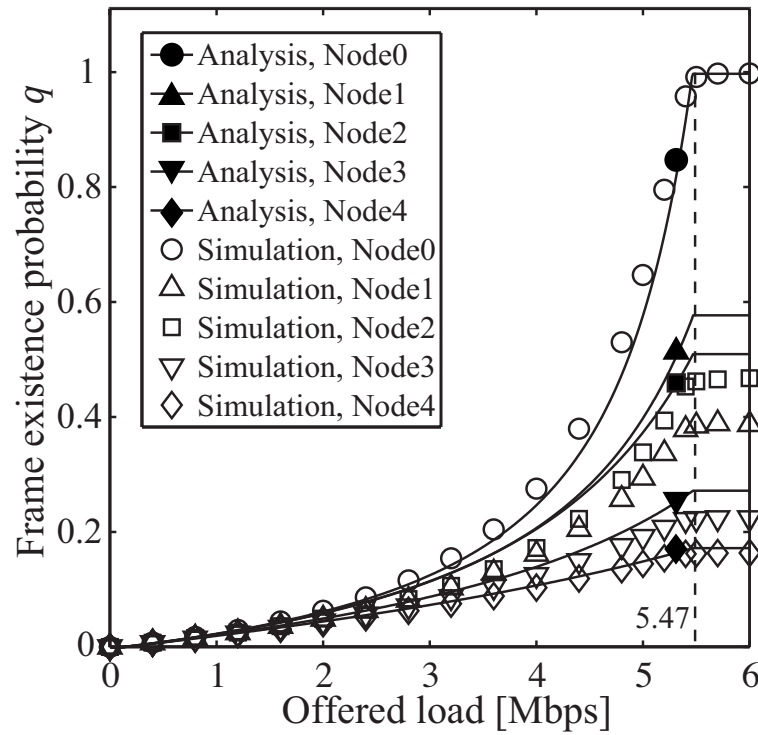


図 4.2: 非同期型 FD MAC を適用した 5 ホップネットワークにおけるフレーム保持確率特性 (ペイロード長: 500[bytes])

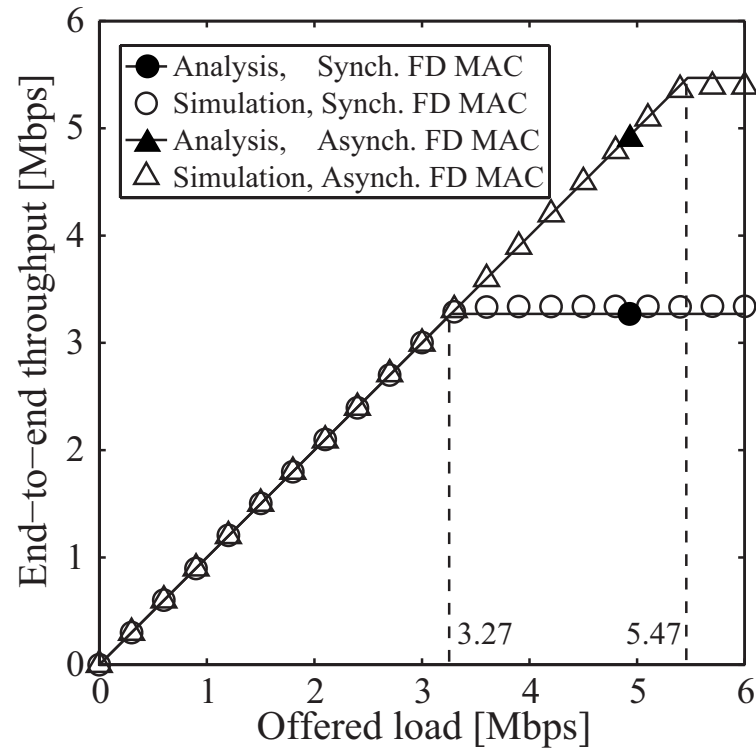


図 4.3: 5 ホップネットワークにおけるエンドツーエンドスループット特性 (ペイロード長: 500[bytes])

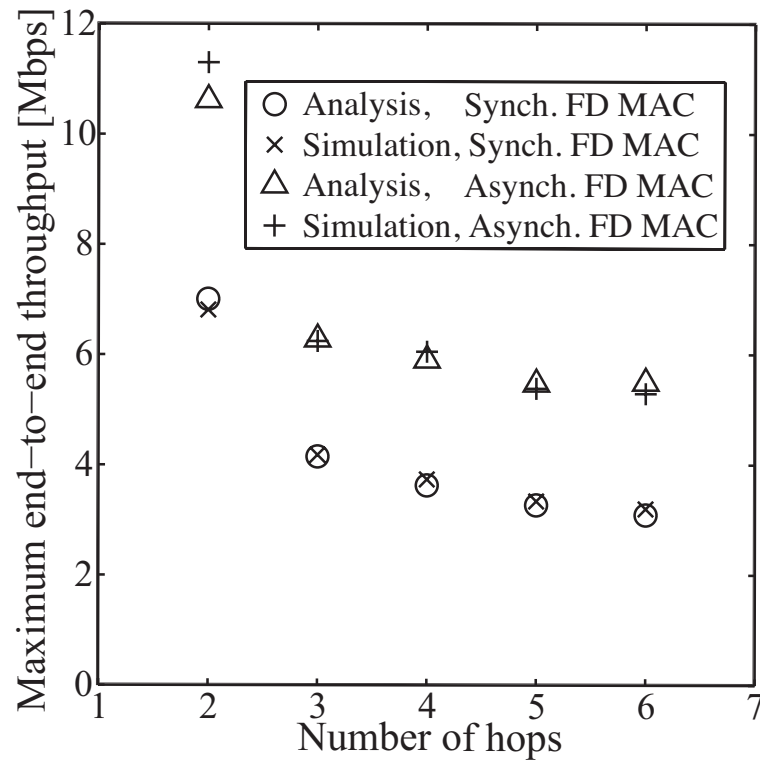


図 4.4: H ホップネットワークにおけるホップ数 H に対する最大スループット (ペイロード長: 500[bytes])

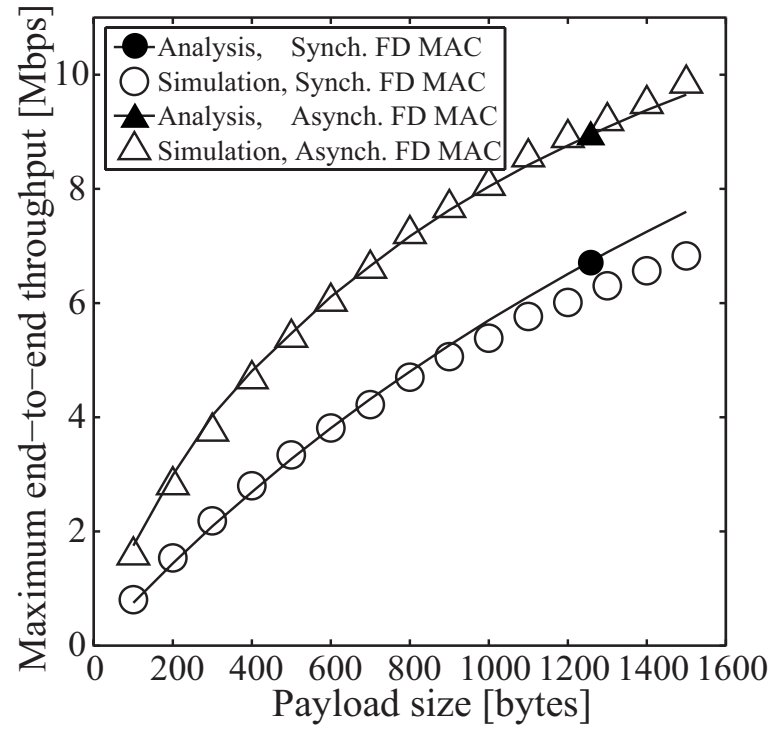


図 4.5: 5 ホップネットワークにおけるペイロード長に対する最大スループット

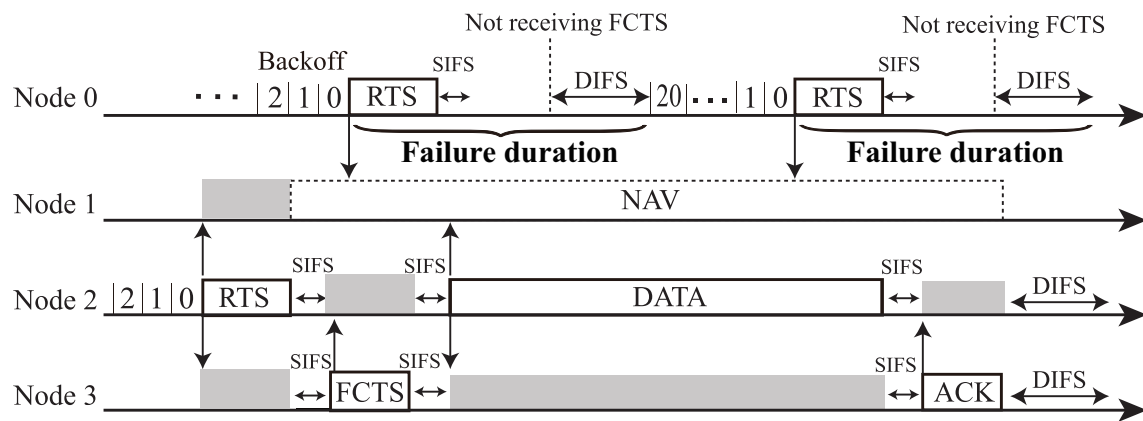


図 4.6: 同期型 FD MAC における連続した送信失敗

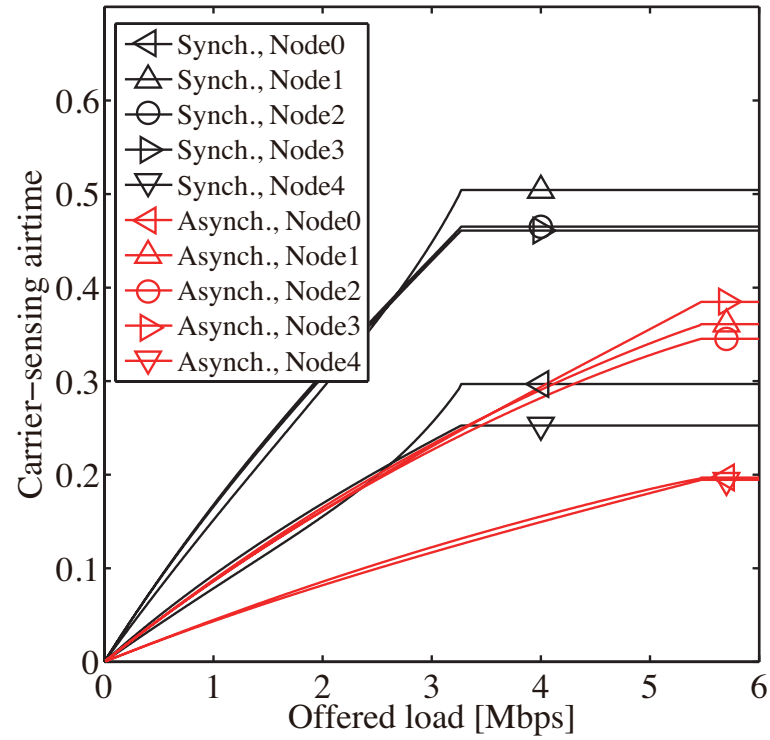


図 4.7: 同期型及び非同期型 FD MAC におけるオフロードに対するキャリアセンスエアタイム (5 ホップネットワーク, ペイロード長: 500[bytes])

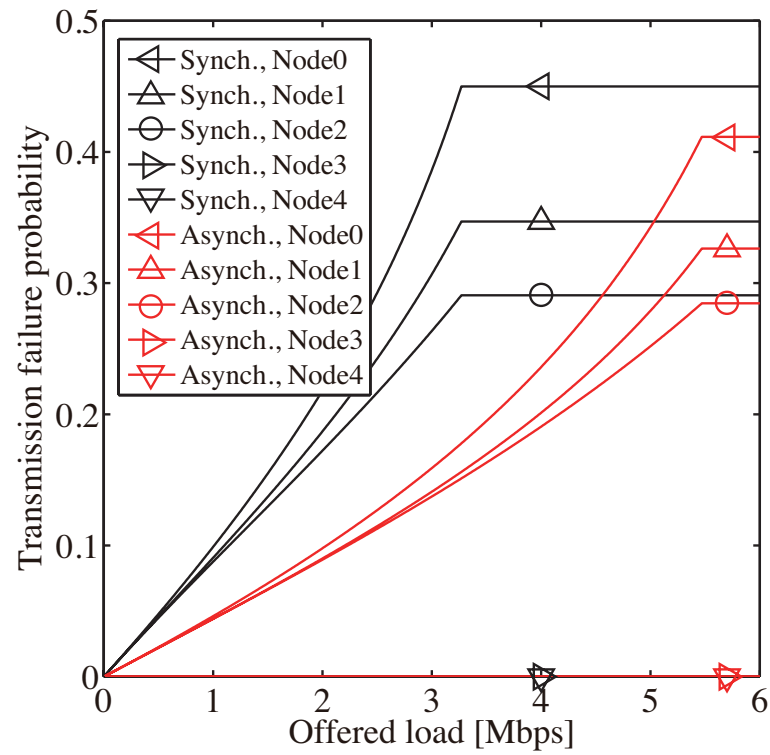


図 4.8: 同期型及び非同期型 FD MAC におけるオフロードに対する送信失敗確率 (5 ホップネットワーク, ペイロード長: 500[bytes])

第5章

双方向フローを持つ無線全二重通信 マルチホップネットワークの性能評価

第4章より, 非同期型 FD MAC が同期型 FD MAC に比べて常に高い性能を引き出すことを明らかにした. しかし, 図 4.1 及び図 4.2 に示される結果から, 本解析で想定したネットワークは宛先に近い端末ほどフレーム保持確率が小さく, 同期型 FD MAC の隠れ端末間の衝突抑制効果があまり効果的でない環境だと考えられる. そこで本章では, 隠れ端末間のフレーム送信の衝突が多くなる環境として相互に通信を行う双方向フローを持つネットワークを想定し, 非同期型 FD MAC と同期型 FD MAC 適用時のネットワーク性能を評価する. なお, 本論文で提案した解析モデルは双方向フローをもつネットワークを対象としていないため, 計算機シミュレーションを用いて性能を調査する. 5.1 節に本章で対象とするネットワークのシステムモデルを示す. 5.2 節ではネットワークのスループットを評価する. 5.3 節ではデータペイロード長を変化させた場合のネットワークの最大スループットを評価する.

5.1 システムモデル

本章では, 図 5.1 に示すような双方向フローを持つ直線状 2 ホップネットワークを対象とする. このネットワークでは 2 つのトラフィックフローが存在しており, 両フローのデータ生起率は等しいとする. フロー 0 (1) は端末 0 (2) が端末 2 (0) 宛てのデータを生起し, 端末 1 がデータを中継する. また, 各端末の送信範囲とキャリアセンス範囲は等しく, 端末 0 と端末 2 は互いに隠れ端末の関係にある. 評価に用いるシステムパラメータは表 4.1 に示した値と同様である.

5.2 エンドツーエンドスループット特性

図 5.2 にオフロードロードに対するフレーム保持確率を示す. ここで, ネットワークは対称性を持ち端末 0 と 2 は同等の振る舞いをするため, 端末 2 の結果は省略している. 凡例において FD w RTS/FCTS は同期型 FD MAC の結果を, FD w/o は制御フレームを使わない非同期型 FD MAC を指す. また, 図 5.3 に全二重通信を行わない場合 (SC 送信確率 $\beta \rightarrow 0$) におけるフレーム保持確率の特性を示す. さらに, 図 5.4 にオフロードロードに対するエンドツーエンドのスループットを示す. なお図 5.2, 5.3, 及び図 5.4 において, データのペイロード長は 500[bytes] としている. 図 5.2 及び図 5.3 より, 全二重通信の適用によりボトルネック端末が端末 1 から端末 0 へ変わることがわかる. これは端末 1 がデータ受信に成功する状況では SC 送信によってフレームを送信でき, フレーム保持確率が常に 1 より小さくなるからである. また, 図 5.2 及び図 5.3 より制御フレームを用いた場合のほうがボトルネック端末のフレーム保持確率が先に 1 になるため, 図 5.4 に示すようにネットワークのスループットは制御フレームを用いた場合のほうが先に最大値をとることが確認できる.

5.3 データペイロード長に対する最大エンドツーエンドスループット特性

図 5.5 にペイロード長に対する最大スループットを示す。図 5.5 より、制御フレームを用いないほうが高い性能が得られることがわかる。またデータペイロード長が短い場合においては、同期型 FD MAC を適用する場合と制御フレーム及び無線全二重通信を採用しない場合と同等の性能となることがわかる。これは制御フレームの使用によるオーバーヘッドが全二重通信による通信効率の向上よりも大きな影響を与えるからだと考えられる。

以上より、隠れ端末間の送信衝突が起こりやすい環境である双方向フローをもつ直線状無線マルチホップネットワークにおいても、非同期型 FD MAC が同期型 FD MAC に比べて高い性能を引き出せるプロトコルであると考察できる。

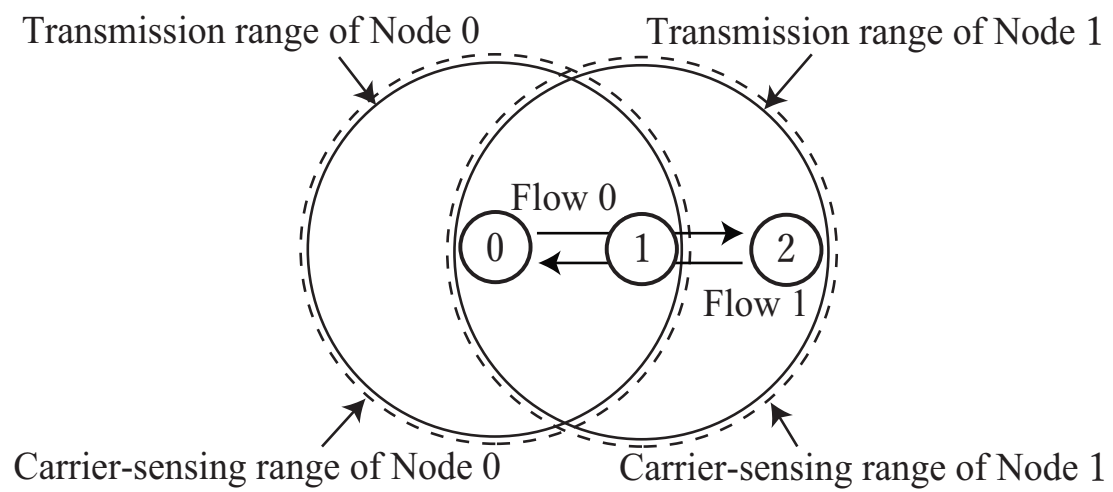


図 5.1: 双方向 2 ホップネットワーク

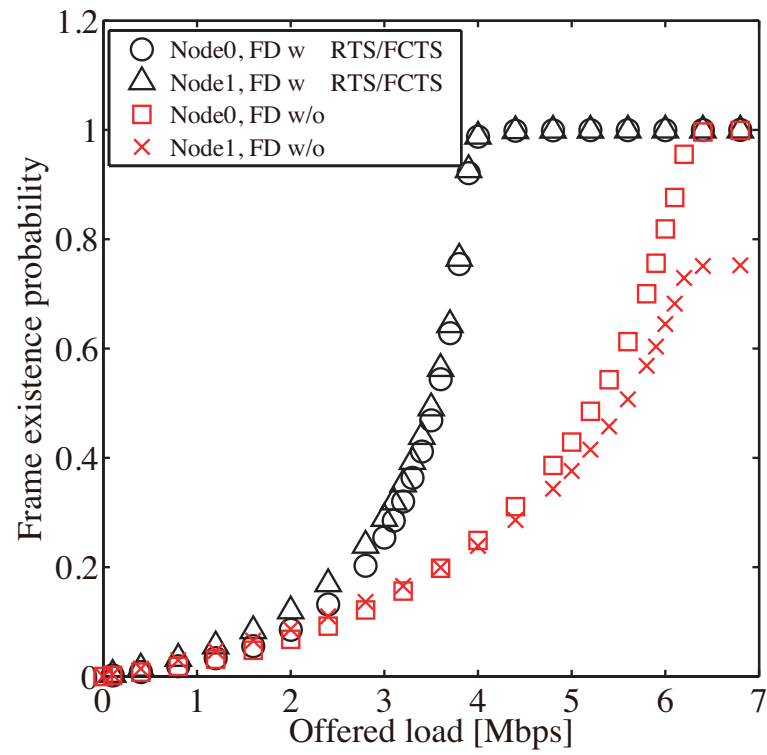


図 5.2: 双方向 2 ホップネットワークにおけるフレーム保持確率特性 (ペイロード長:500[bytes])

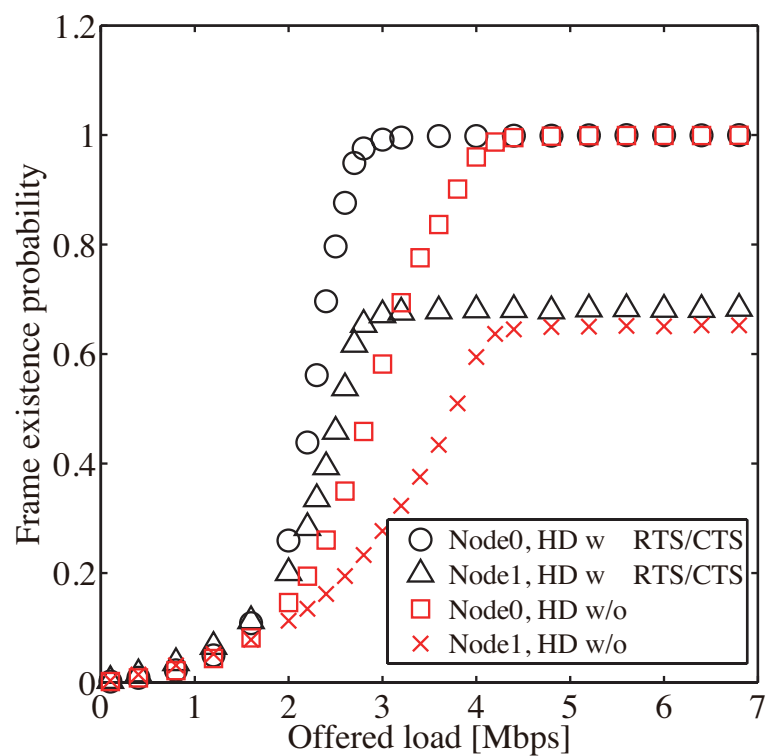


図 5.3: $\beta \rightarrow 0$ としたときの双方向 2 ホップネットワークにおけるフレーム保持確率特性 (ペイロード長:500[bytes])

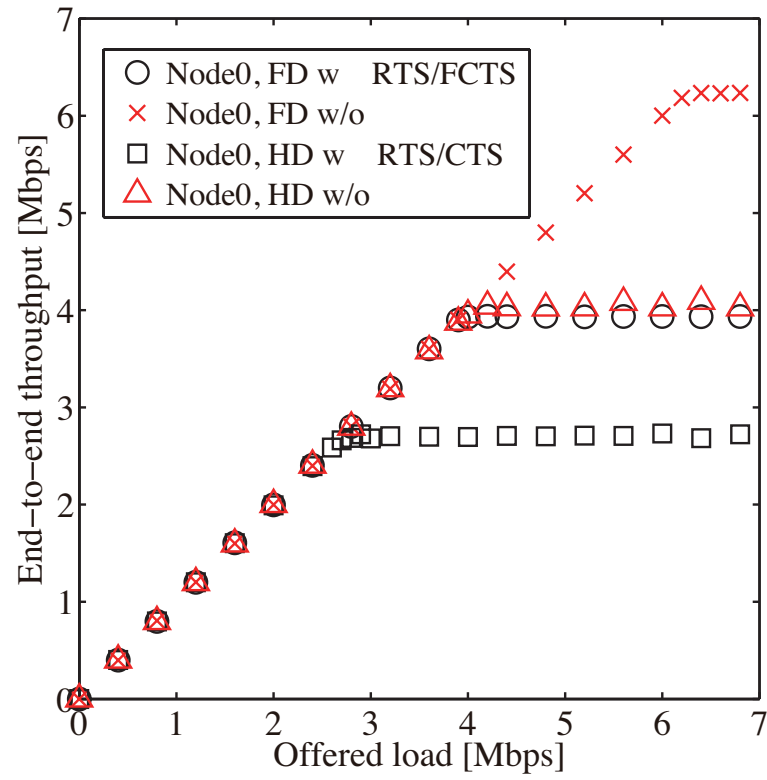


図 5.4: 双方向 2 ホップネットワークにおけるスループット特性 (ペイロード長:500[bytes])

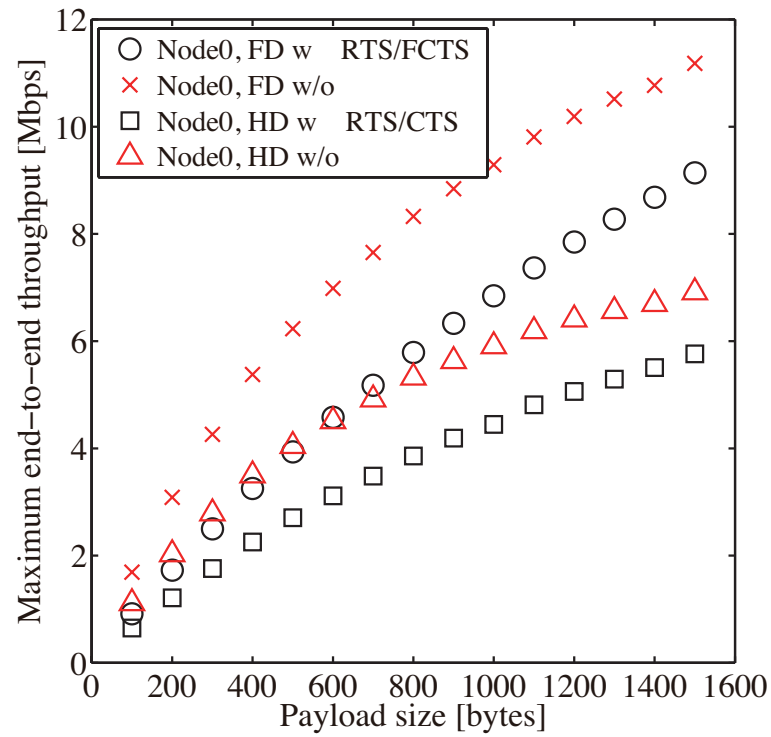


図 5.5: 双方向2ホップネットワークにおけるペイロード長に対する最大スループット

第6章

まとめと今後の課題

本論文では制御フレームの有無による動作の違いに着目し、無線マルチホップネットワークにおいて非同期型及び同期型 FD MAC の両方式に適用可能な一般的な理論解析モデルの構築を行った。得られた解析モデルより、無線マルチホップネットワークにおいて無線全二重通信のための MAC プロトコルとして同期型及び非同期型 FD MAC のそれぞれを適用したときの性能差を理論的に評価することが可能になった。理論解析モデル構築のため、制御フレーム使用による送信失敗時の動作の違いを表現可能な新たな送信エアタイムを提案し、これらを用いてマルチホップネットワークにおける各端末の振る舞いを理論的に表現した。

理論解析モデルから、片方向直線状マルチホップネットワークにおけるオフアードロードに対するフレーム保持確率及びエンドツーエンドスループットの評価、またホップ数及びペイロードサイズに対する最大スループットの評価を行い、計算機シミュレータを用いて提案手法の妥当性を評価した。これによりホップ数、ペイロードサイズによらず非同期型 FD MAC が同期型 FD MAC より優れた性能を引き出すことを理論的に示した。同期型 FD MAC を適用した際、隠れ端末との衝突を抑制するための NAV 動作が性能を大きく劣化させてしまう要因であることを理論的に示した。

また計算機シミュレータを用いて、隠れ端末間の衝突が起こりやすい双方向フロー

をもつ2ホップネットワークに関しても、オフロードに対するフレーム保持確率及びエンドツーエンドスループットの評価、またペイロード長に対する最大スループットの評価を行った。これにより、隠れ端末の送信確率が高い環境においても非同期型FD MACがデータペイロード長に関わらず高い性能を引きだせることを示した。

本論文で提案した理論解析モデルは両FD MACの本質的な動作を表現し、任意のペイロードサイズ及びホップ数においてエンドツーエンドスループットの算出が可能である。また、各端末のフレーム保持確率や送信失敗確率、キャリアセンスエアタイムなどを数式として得られるため、それぞれのFD MACのエンドツーエンドスループットへの詳細な影響を明らかにできる。これにより、エンドツーエンドスループットを向上させるための適切なパラメータ選択やプロトコル設計の手助けとなる。また解析モデル及び計算機シミュレーションによる評価から、本研究で調査した環境下で動作するアプリケーションにおいて無線全二重通信を行う際は非同期型FD MACの使用が適切であることを明らかにした。

今後の課題として、本論文では送信範囲とキャリアセンス範囲が等しいと仮定して評価しているが、実環境ではキャリアセンス範囲は送信範囲より大きいため[31]、そのような環境における解析モデルを構築する必要がある。キャリアセンス範囲が送信範囲の2倍と考えると、隠れ端末が2ホップ先ではなく3ホップ先になり、キャリアセンス範囲内に存在する端末が増加するため端末ごとのキャリアセンスエアタイムや送信失敗確率が現在の解析と大きく異なりネットワークの振る舞いが大きく変わる可能性がある。そのような環境下において解析モデルの構築を行うことで、プロトコル設計に関するさらなる知見を得ることができる。

また、本論文における双方向フロー下での議論はシミュレータによる評価のみだったため、解析モデルを構築しネットワークへの影響を詳細に把握する必要がある。文

献 [30] では2つのフローそれぞれに対して送信エアタイムを導出しそれぞれのフローに対して数式を構築することで双方向フローを持つ無線マルチホップネットワークにおける理論解析モデルの構築を行っている. 文献 [30] では端末がどちらのフローの状態に属しているかを定義するために, マルコフ連鎖モデルの状態を2つのフローへ分割しそれぞれのフローの利用率を定義することで, 端末ごとのそれぞれのフローに対する振る舞いを表現している. 無線全二重通信マルチホップネットワーク下においても同様に, それぞれのフローに対して FD MAC の動作を考慮した数式を導出することで解析可能であると考えられる.

参考文献

- [1] 村上 誉, 石津 健太郎, 川崎 耀, 伊深 和雄, フィリン スタニスラブ, 松村 武, 児島 史秀, “ローカル 5G の現状と今後の展望,” 信学通誌, No.55, pp.246-253, 2020 年 12 月.
- [2] 荻原直彦, “5G における行政の取組みと期待,” 信学通誌, No.55, pp.181-185, 2020 年 12 月.
- [3] C-K. Toh, アドホックモバイルワイヤレスネットワーク: プロトコルとシステム, 構造計画研究所, 2003 年 6 月.
- [4] C Aydogdu, E Karasan. ”Goodput and throughput comparison of single-hop and multi-hop routing for IEEE 802.11 DCF-based wireless networks under hidden terminal existence.” Wireless Communications and Mobile Computing vol.16, no.9 pp.1078-1094, Apr. 2015.
- [5] P.C. Ng, and S.C. Liew, “Throughput analysis of IEEE 802.11 multi-hop ad hoc networks,” IEEE/ACM Trans. Networking, vol.15, no.2, pp.309-322, Apr. 2007.

-
- [6] Y. Gao, D. Chiu, and J. Lui, “Determining the end-to-end throughput capacity in multi-hop networks: methodology and applications,” *Proc. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, vol.34, no.1, pp.39-50, Jun. 2006.
- [7] K. Sanada, J. Shi, N. Komuro, and H. Sekiya, “End-to-end delay analysis for IEEE 802.11 string-topology multi-hop networks,” *IEICE Trans. on Commun.*, vol.E98-B, no.7, Jul. 2015.
- [8] C. Fujimura, K. Sanada, and K. Mori, “Throughput analysis for string-topology full-duplex multi-hop network,” *Proc. IEEE 20th Int. Symp. Wireless Pers. Multimedia Commun. (WPMC)*, Dec. 2017
- [9] C. Fujimura, K. Sanada, and K. Mori, “Analytical expressions for end-to-End throughput of string-topology wireless full-duplex multi-hop networks,” *IEICE Trans. on Commun.*, pp.1160-1169, Jun. 2019.
- [10] T. Sugimoto, N. Komuro, H. Sekiya, et al., “Maximum throughput analysis for RTS/CTS-used IEEE 802.11 DCF in wireless multi-hop networks”, *Proc. International Conference on Computer and Communication Engineering*, pp.1–6, May 2010.
- [11] 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,” *信学誌*, Vol.101, No.4 pp.387-393, 2018 年 4 月.
- [12] M. Jain, J. Choi, T. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, S. Katti, and P. Sinha, “Practical, real-time, full duplex wireless,” *Proc. ACM MobiCom*, pp.301-312, Sep. 2011.

- [13] D. Bharadia, E. McMillin, and S. Katti, “Full duplex radios,” Proc. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol.43, no.4, pp.375-386, Aug. 2013.
- [14] D. Kim, H. Lee, and D. Hong, ”A survey of in-band full-duplex transmission:from the perspective of PHY and MAC layers” IEEE communication survey tutorials, vol.17, no.4, Feb. 2015.
- [15] M. Dibaei, and A. Ghaffari, “Full-duplex medium access control protocols in wireless networks: a survey,” Wireless Networks, vol.26, no.4, pp.1-19, Jan. 2020.
- [16] K. Tamaki, H.A. Raptino, Y. Sugiyama, M. Bandai, S. Saruwatari, and T. Watanabe, “Full duplex media access control for wireless multi-hop networks,” Proc. IEEE 77th Vehicular Technology Conf., pp.1-5, June 2013.
- [17] D. Marlali, and O Gurbuz, “Design and performance analysis of a full-duplex MAC protocol for wireless local area networks,” Ad Hoc Networks, vol.67, pp.53-67, Oct. 2017.
- [18] Y. Song, W. Qi, W. Zhao, and W. Cheng, “Full-duplex MAC protocol for CSMA/CA-based single-hop wireless networks,” Sensors, vol.19, no.10, pp.2413-2426, May 2019.
- [19] E. Askari, and S. Aissa, “Single-band full-duplex MAC protocol for distributed access networks,” IET Commun., vol.8, no.10, pp.1663-1673, Jan. 2014.

-
- [20] L.M. Guimarães, and J.L. Bordim, “An efficient MAC scheme for full-duplex communications on wireless networks,” Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf., pp.1-6, Apr. 2018.
- [21] A. Alim, S. Saruwatari, and T. Watanabe, “Asym-FD-MAC In-band full-duplex medium access control protocol for asymmetric traffic in wireless LAN,” Wirel. Netw., vol.26, no.2pp.1-16, May 2018
- [22] W. Cheng, X. Zhang, and H. Zhang, “RTS/FCTS mechanism based full-duplex MAC protocol for wireless networks,” Proc. IEEE Globecom Workshops, Dec. 2013.
- [23] W. Choi, J. Park, Y. Kim, A. Sabharwal, and H. Lim, “Design and implementation of a full-duplex pipelined MAC protocol for multihop wireless networks,” IEEE Access, vol.5, pp.14930-14942, Jul. 2017.
- [24] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” IEEE Std. 802.11-1999, 1999
- [25] 守倉正博, 久保田周治, 改訂三版 802.11 高速無線LAN教科書, インプレス, 2008.
- [26] P. Chatzimisios, A. C. Boucouvalas and V. Vitsas, “Optimisation of RTS/CTS handshake in IEEE 802.11 Wireless LANs for maximum performance,” Proc. IEEE Global Telecommunications Conference Workshops, pp. 270-275, Jan. 2004.

- [27] K. Sanada, and K. Mori, “Performance analysis of full duplex MAC protocols for wireless local area networks with hidden node collisions,” *IEICE Trans. on Commun.*, vol.E103-B, no.7, pp.804-814, Jul. 2020.
- [28] A. Kumar, E. Altman, D. Miorandi, and M. Goyal, “New Insights From a Fixed-Point Analysis of Single Cell IEEE 802.11 WLANs,” *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol.15, no.3, pp.1550-1561, June 2007.
- [29] R.D. Mohammady, M.Y. Naderi, and K.R. Chowdhury, “Performance Analysis of CSMA/CA based Medium Access in Full Duplex Wireless Communications.” *IEEE Transactions on Mobile Computing* vol.15, no.6, pp.1457-1470, Jun. 2016.
- [30] K. Sanada, N. Komuro, Z. Li, T. Pei, and Y.J. Choi, “Generalized analytical expressions for end-to-end throughput of IEEE 802.11 string-topology multi-hop networks,” *Ad Hoc Networks*, vol.70, pp.135–148, Nov. 2017.
- [31] K. Xu, M. Gerla, and S. Bae, “How effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS handshake in ad hoc networks,” *IEEE Global Telecommunication Conference 2002*, vol.1, pp.17–21, Nov. 2002.

謝辞

本研究の遂行及び論文作成に当たり、ご多忙の中多大なご指導と助言をしていただいた眞田 耕輔助教, 羽多野 裕之准教授, 森 香津夫教授に深く感謝申し上げます.

最後に, 研究室の整備等で陰ながら支えて下さった山本 好弘技術長補佐, ならびに本研究のため御助力を注いでくださいました大学院生, 学部生の皆様方に深く感謝いたします.

令和3年 遊免 陽介

研究業績

- 遊免 陽介, 坂倉 翔太, 眞田 耕輔, 羽多野 裕之, 森 香津夫, “同期型FD MACを用いた無線マルチホップネットワークにおけるスループット解析,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-6-17, 2019 年 9 月.
- Y. Yumen, S. Sakakura, K. Sanada, H. Hatano, K. Mori, “Throughput Analysis for String-Topology Wireless Multi-hop Networks with Synchronous Full-Duplex MAC,” Proceedings of The 9th International Symposium for Sustainability by Engineering at Mie University (Research Area C), Sep. 2019.
- Y. Yumen, S. Sakakura, K. Sanada, H. Hatano, K. Mori, “Throughput Analysis for Wireless Multi-hop Networks with Synchronous Full-Duplex MAC,” Proceedings of The 2020 17th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), pp.505-511, Jan. 2020.
- Y. Yumen, K. Sanada, H. Hatano, K. Mori, “Throughput Analysis for String-Topology Wireless Multi-hop Networks with FD MAC Protocols,” Proceedings of The 10th International Symposium for Sustainability by Engineering at Mie University (Research Area C), Sep. 2020.