

マクロ状態表現による IEEE 802.11 DCF
性能評価手法に関する研究

2018 年 1 月

千葉大学大学院工学研究科
建築・都市科学専攻 都市環境システムコース

李 想

(千葉大学学位申請論文)

マクロ状態表現による IEEE 802.11 DCF
性能評価手法に関する研究

2018 年 1 月

千葉大学大学院工学研究科
建築・都市科学専攻 都市環境システムコース

李 想

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	3
1.3	論文構成	3
第 2 章	無線 LAN 関連技術	5
2.1	IEEE 802.11 諸規格	5
2.1.1	無線 LAN 規格	5
2.1.2	フレームフォーマット	6
2.2	ネットワーク構成	8
2.2.1	アドホックモード	8
2.2.2	インフラストラクチャモード	8
2.3	MAC (Medium Access Control) 層機能	10
2.3.1	DCF (Distributed Coordination Function)	10
2.3.2	IFS (Inter frame Space)	12
2.3.3	デフォルトパラメータ	12
2.4	DCF の通信手順	13
2.5	マルチホップ無線	14
2.5.1	隠れ端末問題	15
2.5.2	さらし端末問題	18
2.5.3	Wi-Fi テザリング	18
2.6	無線 LAN 性能評価手法に関する既存研究	19
2.6.1	シングルホップ無線 LAN	20
2.6.2	マルチホップ無線 LAN	20
2.6.3	Bianchi モデル以外の解析手法	21
2.6.4	ビットエラーを考慮した解析モデル	21

	2.6.5	既存研究のまとめ	21
2.7		まとめ	22
第 3 章		端末のマクロ状態表現を用いた性能評価手法	23
3.1		解析条件	23
3.2		マクロ状態表現	24
3.3		連続時間マルコフ連鎖	25
3.4		大域平衡方程式	27
3.5		未知パラメータの導出方法	29
	3.5.1	キャリアセンス状態への遷移率	29
	3.5.2	フレーム送信失敗率	30
	3.5.3	送信状態への遷移率	31
	3.5.4	数値計算手順	31
3.6		数値評価	32
	3.6.1	シナリオ 1 : シングルホップ無線 LAN	33
	3.6.2	シナリオ 2 : 送信負荷が対称の場合	36
	3.6.3	シナリオ 3 : 送信負荷が非対称の場合	39
3.7		まとめ	42
第 4 章		テザリングユーザ密集環境における性能評価法	43
4.1		対象モデル	43
4.2		解析条件	45
4.3		状態遷移	45
4.4		未知パラメータの導出方法	48
	4.4.1	フレーム送信失敗率	48
	4.4.2	キャリアセンス状態への遷移率	49
	4.4.3	他のネットワークポロジへの拡張	50
4.5		数値評価	52
4.6		まとめ	62
第 5 章		フレーム送信時間の端末依存性を考慮した性能評価手法	63
5.1		対象モデル	64
5.2		状態遷移	64
5.3		端末依存性を考慮したフレーム送信時間算出法	64
	5.3.1	送信失敗時のフレーム送信時間	66
	5.3.2	待機中の端末が観測するフレーム送信時間	67

5.4	数値評価	68
5.4.1	シナリオ 1: ビットエラーが発生する無線 LAN 環境	69
5.4.2	シナリオ 2: フレーム長が異なる場合	71
5.4.3	シナリオ 3: データ送信レートが異なる場合	74
5.5	まとめ	76
第 6 章	結論	77
付録 A	平衡方程式 (3.1), (3.2), (3.3) の解き方	79
謝辞		81
参考文献		83
研究業績一覧		87

目次

1.1	銀座駅周辺の公衆無線 LAN の電波干渉状況	2
2.1	MAC 層フレームフォーマット (共通)	7
2.2	物理層フレームフォーマット (802.11a, g)	7
2.3	物理層フレームフォーマット (802.11b)	7
2.4	アドホックモード	9
2.5	インフラストラクチャモード	9
2.6	指数関数で増大するコンテンションウィンドウ (CW)	11
2.7	DCF の通信手順	13
2.8	ポストバックオフ状態での通信手順	14
2.9	マルチホップ無線 LAN	15
2.10	隠れ端末問題	17
2.11	RTS/CTS による隠れ端末問題の回避	17
2.12	さらし端末問題	18
2.13	Wi-Fi テザリングと Wi-Fi オフロード	19
3.1	2 ホップ無線 LAN: Wi-Fi オフロード	24
3.2	状態遷移図 ($0 < k < K_i$)	26
3.3	状態遷移図 (ポストバックオフ)	26
3.4	シングルホップ無線 LAN	34
3.5	総スループット ($S_i \times n$)	34
3.6	各端末の送信衝突率 (p_i^t)	35
3.7	非飽和状態で各端末の平均待ち行列長	35
3.8	フローごとのスループット	37
3.9	平均待ち行列長 (中継端末)	38
3.10	平均待ち行列長 (ユーザ端末と AP)	38
3.11	フローごとのスループット	40

3.12	平均待ち行列長 (中継端末)	41
3.13	平均待ち行列長 (ユーザ端末と AP)	41
4.1	AP 密集環境でユーザ間の干渉	44
4.2	競合グラフ	45
4.3	状態遷移図 ($0 < k < K_i$)	46
4.4	状態遷移図 (ポストバックオフ)	46
4.5	一般的なネットワークポロジ	50
4.6	スループット (一列に 3 ユーザ)	54
4.7	平均待ち行列長 (一列に 3 ユーザ)	54
4.8	スループット (一列に 4 ユーザ)	55
4.9	平均待ち行列長 (一列に 4 ユーザ)	55
4.10	スループット (一列に 5 ユーザ)	56
4.11	平均待ち行列長 (一列に 5 ユーザ)	56
4.12	スループット (図 4.5a シナリオ)	57
4.13	平均待ち行列長 (図 4.5a シナリオ)	57
4.14	スループット (図 4.5b シナリオ)	58
4.15	平均待ち行列長 (図 4.5b シナリオ)	58
4.16	飽和状態スループット (一列に 3 ユーザ)	60
4.17	飽和状態スループット (一列に 4 ユーザ)	60
4.18	飽和状態スループット (一列に 5 ユーザ)	60
4.19	飽和状態スループット (図 4.5a シナリオ)	61
4.20	飽和状態スループット (図 4.5b シナリオ)	61
5.1	衝突時のフレーム送信時間	65
5.2	総スループット, 端末数, ビットエラーレイトの関係	70
5.3	フレーム送信失敗確率, 端末数, ビットエラーレイトの関係	70
5.4	各タイプの総スループット (マルチフレーム長環境: 飽和状態)	72
5.5	各タイプの総スループット (マルチフレーム長環境: 非飽和状態)	73
5.6	各端末の平均待ち行列長 (マルチフレーム長環境: 非飽和状態)	73
5.7	各端末のスループット (マルチ送信レート環境: 非飽和状態)	75
5.8	各端末の平均待ち行列長 (マルチ送信レート環境: 非飽和状態)	75

第 1 章

序論

1.1 研究背景

近年，家庭・企業・公共交通機関・飲食店などにおいて，インターネットへのワイアレス・アクセス手段である無線 LAN が普及している．無線 LAN は，(1) 簡易な機器でネットワークの構築・拡張ができる，(2) 有線 LAN と比べると物理的な拘束が少ない，(3) 電波が届く範囲内であれば移動中でもサービスを利用できる，などの利点を有している．最近では，2020 年の東京オリンピック開催に向けて，総務省や各自治体なども積極的に公衆無線 LAN の整備を推進しており，その結果，狭いエリアに多数の無線 LAN が高密度で配置される状態が生じている [1]．タブレット端末等とスマートフォンを Wi-Fi で接続し，携帯電話回線でインターネットに接続するテザリングでは，スマートフォンは無線 LAN アクセスポイント (Access Point: AP) として機能することから，テザリングの普及は無線 LAN の密集状況に拍車をかける結果となっている．

2.4GHz 帯を利用する IEEE 802.11g と IEEE 802.11b では，互いに影響を受けずに同時に利用できる周波数帯は高々 4 つしかない (5GHz 帯においては，干渉せずに同時に利用できる周波数帯は 19 個存在する)．AP が高密度に配置されると，近い距離にある無線 LAN が互いに同じ周波数帯を共有する可能性が生じ，その場合，深刻な電波干渉が発生する (図 1.1) [2]．同じ無線 LAN を利用する端末間に加えて，(同じ周波数帯を共有する) 異なる無線 LAN を利用する端末間でも帯域の奪い合いによるフレーム衝突が頻発し，フレーム再送による伝送遅延やバッファ溢れによるフレーム損失が生じやすくなる．このような状況における無線 LAN のスループット性能は必ずしも明らかにされておらず，シミュレーションによる評価に加えて解析的にスループット性能を知る手段が重要になると考えられる．

単一の無線 LAN の性能解析には，端末の状態をバックオフカウンタとバックオフステージ (連続した再送信の回数) の二つで表現する Bianchi モデル [3] が用いられること

が多い。ある時点での各端末の状態を与えると、これ以降の状態変化が離散時間マルコフ連鎖によりモデル化される。この手法を用いたモデルは、各端末が飽和状態（端末が常に送信フレームを持つ状態）で高い精度を示すことが知られる。しかし、現実の通信ではデータは間欠的に送られるので、通信端末は一般に非飽和状態にある。Bianchi モデルの非飽和状態への拡張も提案されているが、Bianchi モデルをベースとした非飽和状態の解析は難解になる。特に、非飽和状態においては、本質的に端末内部に形成されるフレームの待ち行列長の解析が必要であるが、Bianchi モデルに基づく待ち行列長の解析は非常に複雑であり、計算量も多い。

周波数帯を共有する複数の無線 LAN が密集して存在する環境を扱うには、マルチホップ無線 LAN と同等の解析手法が必要になる。マルチホップ無線 LAN の解析には、Bianchi モデルよりも端末の状態を粗く表現するマクロモデルが用いられることが多く、一般に、解析は容易である。しかし、非飽和状態を考慮できなかつたり、端末内部のフレームの待ち行列が考慮されていなかつたりするケースが多い。

また、無線 LAN を利用する端末のフレームサイズはアプリケーションに依存する。例えば、音声通話では低遅延であることが重要なので、音声通話アプリケーションでは数百バイト程度の短い UDP フレームを用いる。一方、動画配信アプリケーションは、高品質かつ安定的なデータフローを流すため、1500 バイトの TCP フレームを利用することが多い。また、無線 LAN では、劣悪な利用環境のため高速な伝送速度を維持することが困難な場合には、低速な伝送速度へ切り替え、逆に、通信環境が優れる場合には、高い伝送速度へ変更を行うマルチレート制御が行われる。このように、現実にはフレーム長やフレーム送信速度が端末によって異なるが、フレーム長やフレーム送信速度の端末依存性を考慮できる解析モデルは少ない。

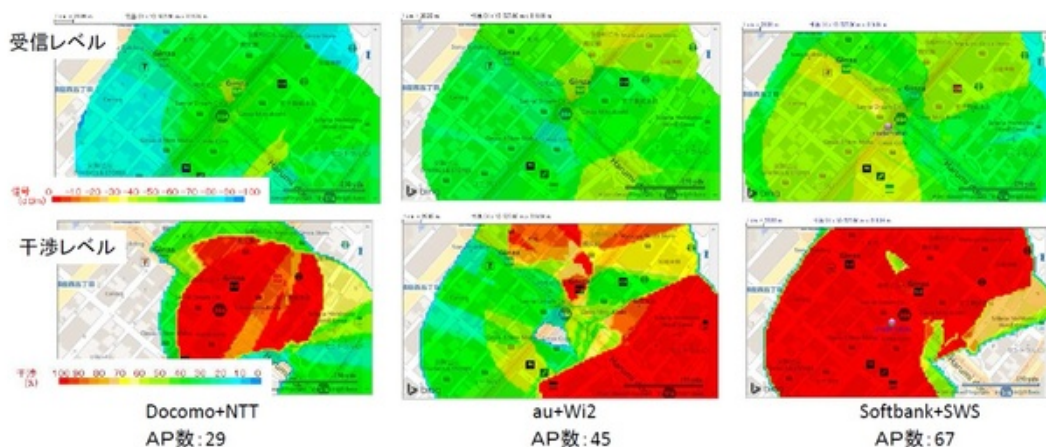


図 1.1: 銀座駅周辺の公衆無線 LAN の電波干渉状況

1.2 研究目的

前節で述べた既存研究では未対応の課題の解決を目的として、本論文では（1）端末内のフレーム待ち行列長を考慮した非飽和状態性能評価手法、（2）複数無線 LAN 存在環境における性能評価手法、（3）フレーム長やフレーム送信速度の端末依存性を考慮した性能評価手法をそれぞれ提案する。

まず「待ち行列長を考慮した非飽和状態性能評価手法」については、端末の状態を少数のマクロ状態（チャンネルアイドル状態、送信状態、キャリアセンス状態）に縮約して表現することで従来手法の問題点に対応する。端末の状態の縮約表現を用いることで、端末内のフレーム待ち行列長を考慮した場合においても状態数の過度の増大を抑えられ、端末の状態と待ち行列長の変化を連続時間マルコフ連鎖で追うことが可能になる。これにより、従来、難解であった非飽和状態におけるフレーム待ち行列長の解析が容易になることを示す（3章）。

次いで、上記の性能評価手法を「複数無線 LAN 存在環境における性能評価」にも適用する。本論文では、複数のテザリングユーザが互いに近くにいる状況を想定し、上記の性能評価手法を適用することで、各ユーザのスループット性能が適切に評価できること、ならびに、複数のテザリングユーザが存在する環境では、テザリングユーザ間の電波干渉により、一部のユーザのスループットが極端に低下する現象がみられることを示す（4章）。

最後に、上記の性能評価手法を各端末のフレーム送信時間が異なるケースを扱えるように拡張する。フレーム衝突時のフレーム送信時間（フレーム送信中の端末によりチャンネルが占有されている時間）は、衝突に会ったフレームのうち送信に最も時間がかかるフレームの送信時間に等しい。衝突を起こす端末の組み合わせを全て考慮して、衝突時のフレーム送信時間を決定するのは容易でなく、端末数が増えると衝突を起こす端末の組み合わせも爆発的に増える。本論文では、衝突時のフレーム送信時間を、厳密にかつ少ない計算量で効率的に評価する手法を示す（5章）。

1.3 論文構成

以降、2章において IEEE 802.11 規格に基づく無線 LAN 諸規格及び関連技術の概要について述べる。3章では端末状態の縮約表現（マクロ状態表現）を用いた連続時間マルコフモデルによる性能評価手法について述べ、提案手法の精度をシミュレーションにより検証した結果を報告する。4章ではテザリングユーザ密集環境における性能評価法の概要と、シミュレーションによる精度検証結果について述べる。5章ではフレーム送信時間の端末依存性を考慮した性能評価手法と、シミュレーションによる精度検証結果について述

べる。最後に，6 章において論文をまとめる。

第 2 章

無線 LAN 関連技術

本章で、研究対象となる無線 LAN 諸規格及び関連技術について簡単に説明する。本章の内容は文献 [4,5] に参考して作成した。

2.1 IEEE 802.11 諸規格

IEEE 802.11 [4] は、IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineer : 米国電気電子技術者協会) のワーキンググループであり、無線 LAN 仕様を開発している。グループの活動は 1990 年代後半から始まり、それから 802.11a, b 及び g を含む複数の規格化とその修正を行ってきた。IEEE 802.11 無線 LAN は Wi-Fi とも呼ばれる。現在ではほぼすべてのパソコンとスマートフォンで標準機能として含まれ、非常に普及した技術といえる。この節で、代表的な IEEE 802.11 規格において物理層と MAC 層の違いについて述べる。

2.1.1 無線 LAN 規格

IEEE 802.11b

IEEE 802.11b は「ISM バンド」と呼ばれる 2.4GHz の周波数帯を使用し、高速通信の実現を目的として規格化された。オリジナルの IEEE 802.11 規格をベースに CCK 変調方式を採用することにより、伝送速度は最大 11Mbps に達した。ISM バンドが免許不要のため、様々な機器に使用されており、非常に込み合った周波数帯といえる。無線 LAN の場合は、2400~2483.5MHz の 83.5MHz の帯域幅を使用し、5MHz 間隔で 13 チャンネルが用意されていて、日本の場合は 2471~2797MHz の 1 チャンネルを加えて 14 チャンネルが使用可能である。ただし、同じ場所で使用する場合、干渉を避けるために 3 チャンネル、最大 4 チャンネル (日本のみ) まで同時に使用できる。

802.11b には、1, 2, 5.5, 11Mbps の 4 つの伝送レートが規定されている。

IEEE 802.11a

IEEE 802.11a は U-NII バンドの 5GHz 帯を使用している。変調方式を OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiple) にすることにより最大 54Mbps の伝送速度へと飛躍的に伸びた。5GHz 帯には 5180~5320MHz, 5500~5700MHz に 20MHz 間隔で 19 チャンネルが用意されている。各チャンネルの周波数帯は完全に独立しており、802.11b/g に比べて干渉を受けにくく、比較的安定した通信を行うことができる。ただし、802.11a が使用した一部のチャンネルは気象レーダーや航空機のレーダーと周波数を共用しているため、電波法により屋外の利用には制限がある。

802.11a には、6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54Mbps の 8 つの伝送レートが規定されている。

IEEE 802.11g

IEEE802.11g は 802.11b と同様に 2.4GHz の周波数帯域を使用する。また、802.11a と同様に変調方式に OFDM を使用することにより、54Mbps の最大伝送速度を実現している。現在普及している一般的な AP はマルチモードに対応しており、IEEE 802.11b と IEEE 802.11g の端末が混在しても対応することが可能である。ただし 802.11g と 802.11b の機器と混在した場合、802.11b モードにて動作するため最大伝送速度も 11Mbps となる。802.11g では、802.11b で規定されている 4 つの伝送レートの他に、オプションとして、5.5, 11, 22, 33Mbps の PBCC 方式と 6~54Mbps の OFDM 方式を選択できる。

2.4GHz 帯を使用する 802.11b または 802.11g 端末は、5GHz 帯を使用する 802.11a 端末より電波の減衰が小さく、壁などの障害物に対しても電波が通過しやすい特徴があり、広いエリアで通信を行うことが可能になる。一方、電波干渉が発生しやすいため、無線 LAN が密集して存在する環境で通信速度が大幅に低下すると言った欠点がある。

それ以外、100Mbps 以上の更なる高速化を目的とした規格である IEEE 802.11n/ac などが標準化されている。本研究の対象ではないため、詳細の説明は省略とする。

2.1.2 フレームフォーマット

802.11 無線 LAN の MAC 層において、無線端末間でやり取りされるパケットのフレームフォーマットを図 2.1 に示す。フレームの基本フォーマットは、各 802.11 無線 LAN 規格の物理レイヤで共通となっている。物理層のフレームフォーマットは採用された変調方式により異なる。図 2.2 と 2.3 は、802.11a, 11g が OFDM 方式を用いる場合と、802.11b が CCK 方式を用いる場合のそれぞれの物理層フレームフォーマットを示したものである。

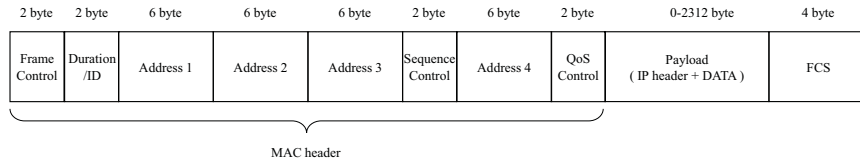


図 2.1: MAC 層フレームフォーマット (共通)

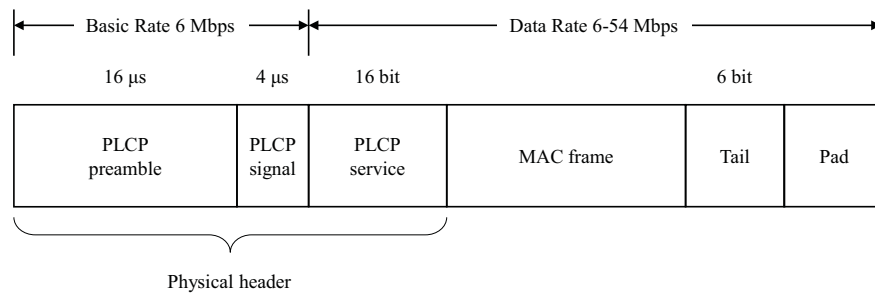


図 2.2: 物理層フレームフォーマット (802.11a, g)

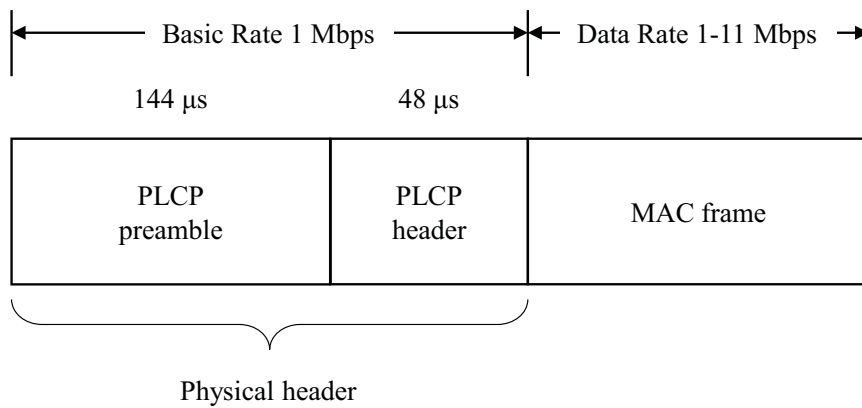


図 2.3: 物理層フレームフォーマット (802.11b)

2.2 ネットワーク構成

無線 LAN でネットワークを構築する場合、アドホックモード (図 2.4) とインフラストラクチャモード (図 2.5) という 2 種類の接続形態がある。無線 AP を介さずに、無線端末同士が直接的、対等に互いに通信を行う方式をアドホックモードという。これに対して、無線 AP を介して通信を行う方式をインフラストラクチャモードという。この節で 2 つの動作モードの特徴を述べる。

2.2.1 アドホックモード

無線 AP を必要としないので、一時的に集まった無線端末でネットワークを随時構築することができる。また、端末同士は自律分散で制御を行うため、ネットワークに参加・離脱することは簡単に済む。これらの特徴を利用して、地震・洪水などの自然災害が発生した後、既存の通信インフラが破壊された場合には、一時的な通信手段として柔軟かつ簡単にネットワークを構築することができる。ただし、アドホックモードでは、2 台の端末間で通信を行う間に他の端末がそれらと通信ができないというデメリットもある。

2.2.2 インフラストラクチャモード

無線端末は AP を介して通信を行い、複数の端末が同時にインターネットに接続することができる。現在さまざまな場所で設置されている公衆無線 LAN は一般的にインフラストラクチャモードを用いる。AP はイーサネットなどを介してバックボーンネットワークに接続されており、AP に接続されている無線端末とバックボーンネットワーク間のパケットの中継を行う。本研究ではインフラストラクチャモードを利用する無線 LAN を対象として検討する。

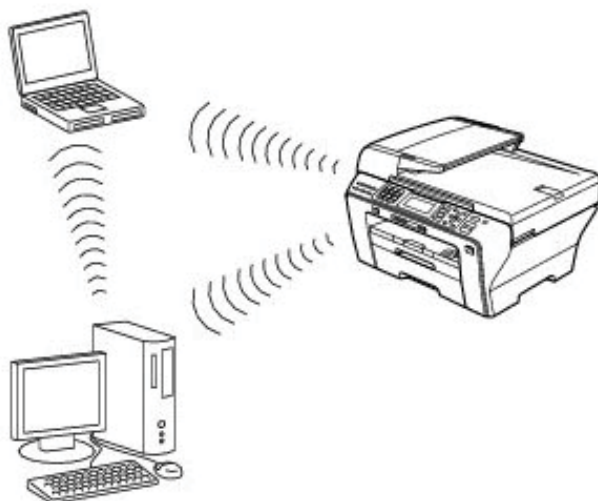


図 2.4: アドホックモード

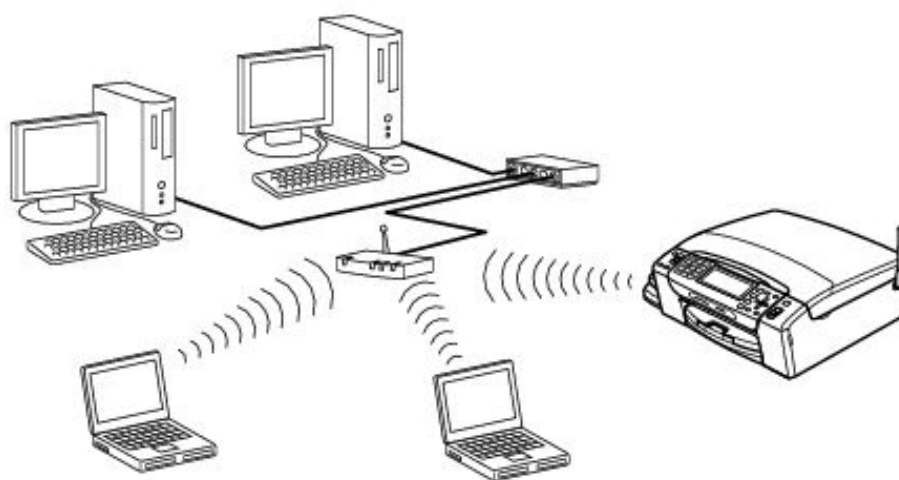


図 2.5: インフラストラクチャモード

2.3 MAC (Medium Access Control) 層機能

無線端末は、送信フレームをブロードキャストするという形式で通信を行う。2 台以上の端末が同時にフレームを送信すると、電波干渉が発生し送信失敗になる可能性がある。IEEE 802.11 無線 LAN の MAC 層の主な役割は、各無線端末の送信タイミングを制御し、なるべく高い成功率でフレームの送受信を実現することである。

MAC 層の基本機能は、AP と端末間のマネジメントおよび無線チャネルアクセス制御の 2 種類である。マネジメント機能は主に、(1) 端末の認証と接続、(2) 端末間のパワーマネジメント状態管理、(3) AP と端末間の同期、などである。一方、無線チャネルへのアクセス制御は、(1) ランダムアクセスによる無線チャネル競合時の送信機会の平等化、(2) 隠れ端末対策 (RTS/CTS 制御)、(3) 送信失敗時の再送制御、(4) ボーリング方式による非競合アクセス (オプション)、などである。その中、無線チャネルへのアクセスを制御する DCF 仕様は本研究と特に関係するので、次で詳細に述べる。

2.3.1 DCF (Distributed Coordination Function)

IEEE 802.11 無線 LAN では、パケットの衝突を前提として、自律分散的アクセス制御 DCF を使用する。DCF には CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) というプロトコルが導入される。端末は通信開始前にキャリアセンスを行って無線チャネルの使用状況を確認し、一定期間未使用 (アイドル状態) ならば送信を開始し、使用中 (ビジー) であればアイドル状態になるまで送信を延期する。データフレームが正常に送信された場合、受信側は MAC 層レベルの ACK (Acknowledgement) フレームを返信する。送信側は ACK を受け取ることにより、データが正常に送信されたことを確認し、次のフレーム送信手順に移る。

複数の端末の同時送信によるフレーム衝突を回避するために、各端末はフレーム送信前に「バックオフ時間」と呼ばれる長さの期間待機する。バックオフ時間は、0 から CW (Contention Window) までの範囲の一様乱数を発生させ、その乱数値 (バックオフカウンタ) のスロットタイム (Slot time) 倍で与える。

$$\text{Backoff time} = \text{Random}(0, CW) \times \text{Slot time}.$$

各端末はチャネルがアイドル状態の間に、バックオフカウンタをスロットタイム時間毎に減算し、バックオフカウンタがゼロになった時点で送信を開始する。残り時間がゼロになる前に他の端末が送信を開始した場合には、送信待機状態となり、チャネルがアイドル状態になった時点から残りのバックオフタイマーから再び減少させる。

CW は、最小値 CW_{min} と最大値 CW_{max} の範囲内の整数である。初期状態で CW が

CW_{min} に設定される。送信に連続して失敗するたびに、 CW は次式に基づいて指数的に増大する。フレーム送信に成功すると、 CW は CW_{min} に戻る。

$$CW = (CW_{min} + 1) \times 2^n - 1 \quad (n \text{ は再送回数} \geq 0).$$

CW は最大値 CW_{max} に達すると、さらに連続して送信に失敗しても、その値のまま推移する。例えば $CW_{min} = 15$, $CW_{max} = 1023$ とした場合、再送による CW の変化は図 2.6 のようになる。ただし最大再送回数（通常 7 回、プロトコルに依存する）に達しても送信に失敗した場合、フレームは廃棄され、 CW は初期値 CW_{min} に戻る。

フレーム衝突に遭った各端末は、バックオフ制御により CW の値が指数的に増大するため、より長く待機することになる。その結果、フレームの再衝突確率は減少し、ネットワークの輻輳状況は一定程度改善される。DCF はこのような仕組みを用い、各端末の送信タイミングを制御する。

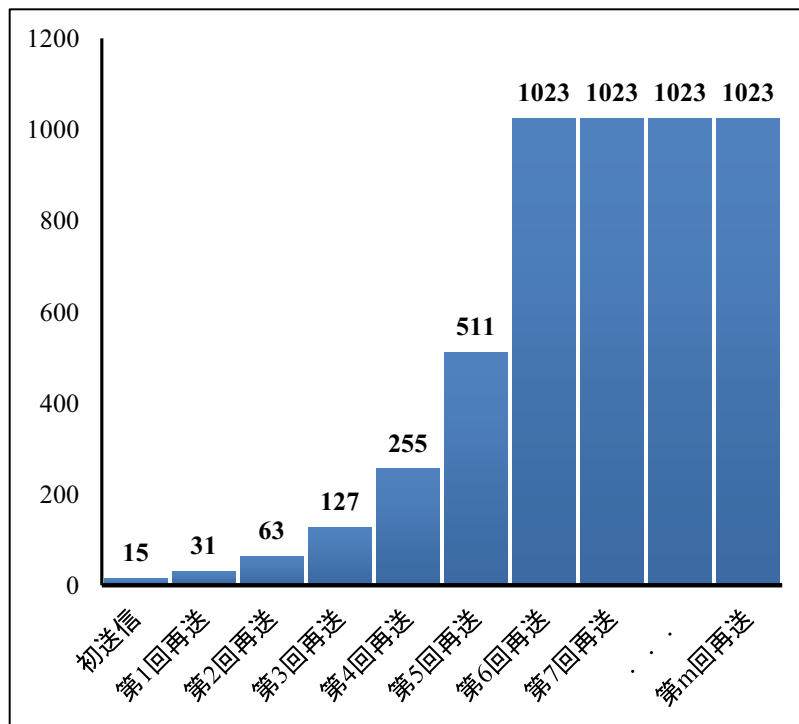


図 2.6: 指数関数で増大するコンテンションウィンドウ (CW)

2.3.2 IFS (Inter frame Space)

無線 LAN では、フレームを送信する前に最低限のキャリアセンス時間を確保するために、IFS という待機時間が定義されている。キャリアセンスを効果的に行うために複数の IFS 時間が用いられ、使い分けることによりフレームの優先送信を制御できる。IFS の優先度は高い順に SIFS, PIFS, DIFS, EIFS となる。

SIFS (Short IFS)

最も短い間隔である。SIFS を使うことで、フレームが最優先で送信されることができる。データフレームを正しく受信したことを送信側に知らせるための ACK フレームや、後述する隠れ端末問題を回避するための RTS/CTS フレームの送信などに用いられる。

PIFS (PCF IFS)

PCF (Point Coordination Function) モードで使用するフレーム間隔である。802.11 規格では、分散制御 DCF 以外にポーリング信号による集中制御方式 PCF がオプションとして定義されている。PCF モードでは、AP が各端末に順番にポーリング信号を送信し、信号を受け取った端末のみがフレーム送信が許可されるという制御方式である。ポーリング信号の送信時に PIFS 時間を使用する。

DIFS (DCF IFS)

DCF モードで使用するフレーム間隔である。キャリアセンスを行う際に、チャンネルがアイドル状態であると判断するために必要となるチャンネルの連続未使用期間が DIFS により決められる。

EIFS (Extended IFS)

拡張フレーム間隔である。チャンネルがビジーかつビジーの原因はフレーム受信エラーと検出された時、ビジー後に DIFS の代わりに EIFS 時間で待機する。EIFS 期間長は、次のように計算される。

$$EIFS = SIFS + ACK \text{ 送信時間} + DIFS.$$

2.3.3 デフォルトパラメータ

IEEE 802.11 諸規格のデフォルトパラメータは表 2.1 でまとめる。

表 2.1: IEEE 802.11 諸規格デフォルトパラメータ値

	802.11a	802.11b	802.11g
Data Rate	6-54 Mbps	1-11 Mbps	6-54 Mbps
Slot time	9 μ s	20 μ s	20 μ s
SIFS	16 μ s	10 μ s	10 μ s
DIFS	34 μ s	50 μ s	20 μ s
CW_{min}	15	31	31
CW_{max}	1023	1023	1023

2.4 DCF の通信手順

図 2.7 に DCF 制御による通信手順の例 (STA 1 と STA 2 の 2 台の端末が AP に送信する場合) を示す. 各端末は DIFS 時間に渡って信号が検出されなければ, チャンネルがアイドルとなったと判断し, 衝突回避のためのバックオフ制御, すなわちランダムに設定したバックオフ時間が経過するまで送信待機し, バックオフ時間経過後に, フレーム送信を開始する.

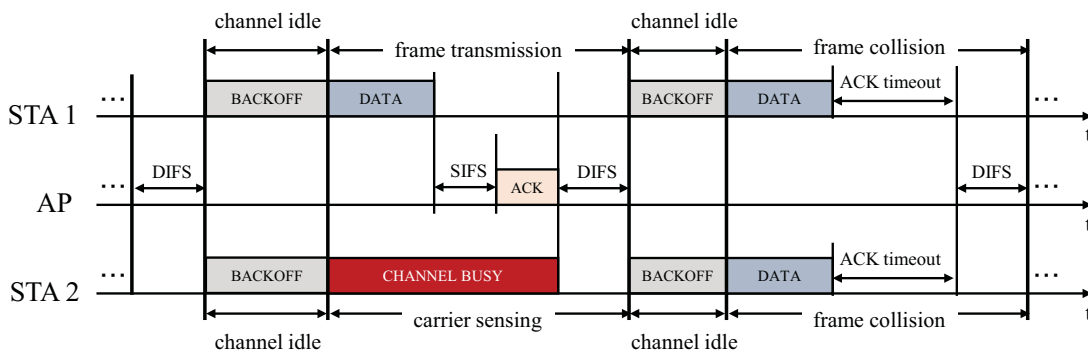


図 2.7: DCF の通信手順

この図に示したケースでは, STA 1 のバックオフ時間の方が短いため, 先にフレーム送信を開始している. フレーム送信後, SIFS 時間経過後に AP から STA 1 宛ての ACK フレームが送信されると, 送信が完了する. STA 1 の送信中は, STA 2 はバックオフカウンタを停止し, キャリアセンス状態に移行する. STA 1 の送信終了後, DIFS 時間経過すると, STA 1 と STA 2 はバックオフ制御 (バックオフカウンタの減算) を再開する. この例

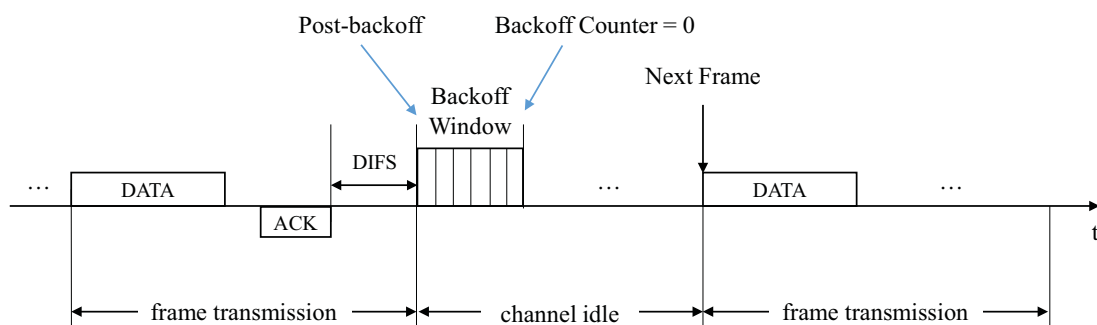


図 2.8: ポストバックオフ状態での通信手順

では、二つの端末は偶然同じ時間にバックオフカウンタが0になり、同時にフレームを送信し、衝突が発生している。端末数が増加した場合、同じ乱数値を生成する確率が増えるため、フレームの衝突確率も増加する。衝突後に STA 1 と STA 2 は ACK timeout という期間内に AP からの ACK フレームを受信できないため、フレーム再送の手順を行う。

非飽和状態にある無線端末は、送信バッファにフレームを持たない期間がある。DCF では、フレーム送信後に、次の送信フレームを持つかどうかに関わらず、必ず新たなバックオフ制御を行う。この場合での端末の状態は「ポストバックオフ (Post-backoff) 状態」と呼ばれる [6]。図 2.8 は、ポストバックオフ状態にある端末が、チャンネルアイドルの期間にバックオフカウンタを減算し、ゼロになった時点で依然としてフレームを持たず、待機状態にとどまる例を示している。この場合、待機状態でフレームが到着すると、端末はキャリアセンスを行い、チャンネルがアイドルのままであれば、端末が直ちにフレーム送信を開始する。チャンネルがビジー状態であれば、端末がバックオフカウンタを再設定し、キャリアセンス状態に移行する。

2.5 マルチホップ無線

家庭、オフィス、公衆エリアにおいて、無線 LAN の利用が拡大している。しかし無線 AP の電波強度が制限されているため、端末と AP の距離が一定以上となると利用できなくなる。距離が近くても、壁が複数存在すると接続しにくくなる、などの問題が生じる。これらの問題を解決するための手段として、AP を中継端末として利用するマルチホップ無線 LAN 技術が検討されている (図 2.9)。AP 間を 802.11 無線 LAN で結ぶことにより、設置や移動に対する自由度が高く、無線 LAN のサービスエリアを容易に拡大できるというメリットがある。マルチホップ無線 LAN は、次のような特徴が挙げられる [7]。

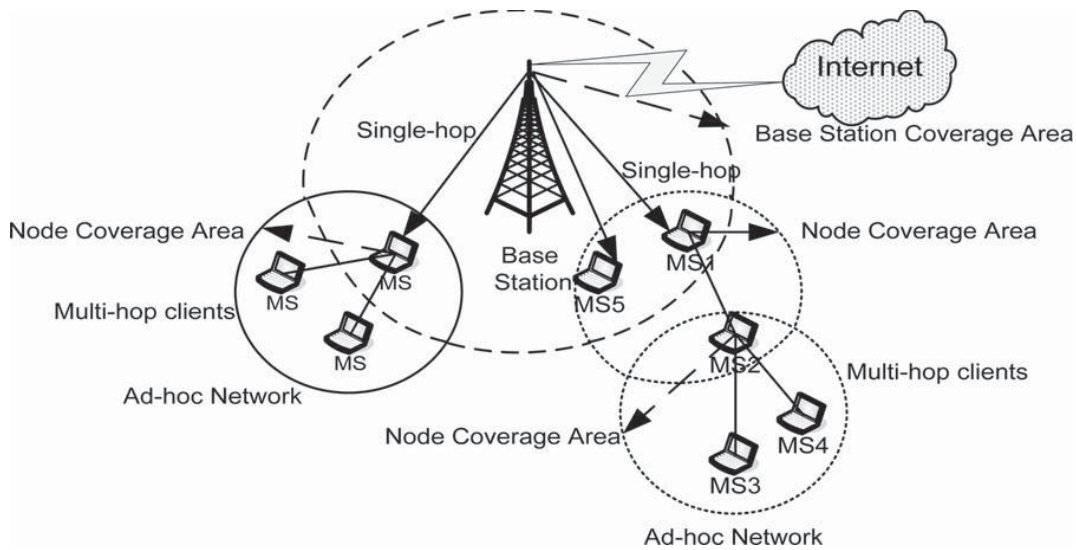


図 2.9: マルチホップ無線 LAN

1. 無線 LAN の AP を互いに有線で接続する必要がない（無線マルチホップで通信を行う）。
2. 自律分散で制御経路を行うため，AP を置くだけでよい。
3. 端末へは従来の無線 LAN サービスを提供し特別な機能を必要としない。
4. 拡張性があり，AP を自由に追加できる。
5. 端末へインターネット接続サービスを提供できる。

マルチホップ無線 LAN は，中継時に受信および送信のためにリンクが 2 度使用されるため，シングルホップ無線 LAN と比べ通信効率が落ちる問題がある．中継端末数が多いほど，ネットワーク全体としては伝送特性が低下する．それに，端末間の距離，障害物などの影響により，互いの電波を検知できない端末同士が存在すると，フレーム衝突が頻繁に発生し，フレーム再送による送信遅延の増大や，再送回数超過によるパケット廃棄などの通信品質問題が生じる．これらの問題は，パケット受信を保証しない UDP フローおよびリアルタイム通信が必要となる VoIP や動画ストリーミングなどに重大な影響を及ぼす．

2.5.1 隠れ端末問題

無線 LAN のアクセス制御に使用されている CSMA/CA 方式は無線端末同士が互いの電波を検出できることを前提としている．障害物の影響や，受信電波レベルの設定などにより，端末同士が互いの存在を感じられないケースがある．図 2.10 のように，4 つの端末が配置され，互いの電波を検出できない端末 1 と 3 は別々で端末 2 と 4 に送信する場合は，

端末 3 の送信が正常に端末 4 に受信されるが、端末 1 の送信は端末 2 で衝突が発生する。端末 1 と 3 が互いに隠れた存在であるため、隠れ端末問題と呼ばれる。

隠れ端末問題によるフレーム衝突を軽減するために、IEEE 802.11 では送信要求 RTS (Request To Send) フレームと送信確認 CTS (Clear To Send) フレームを使った仮想キャリアセンス方式が規定されている。図 2.11 の示すように、端末 1 が端末 2 にデータを伝送する場合、端末 3 は端末 2 からの CTS を受信することから、端末 1 の送信状態を認識でき、フレーム衝突を防ぐことができる。

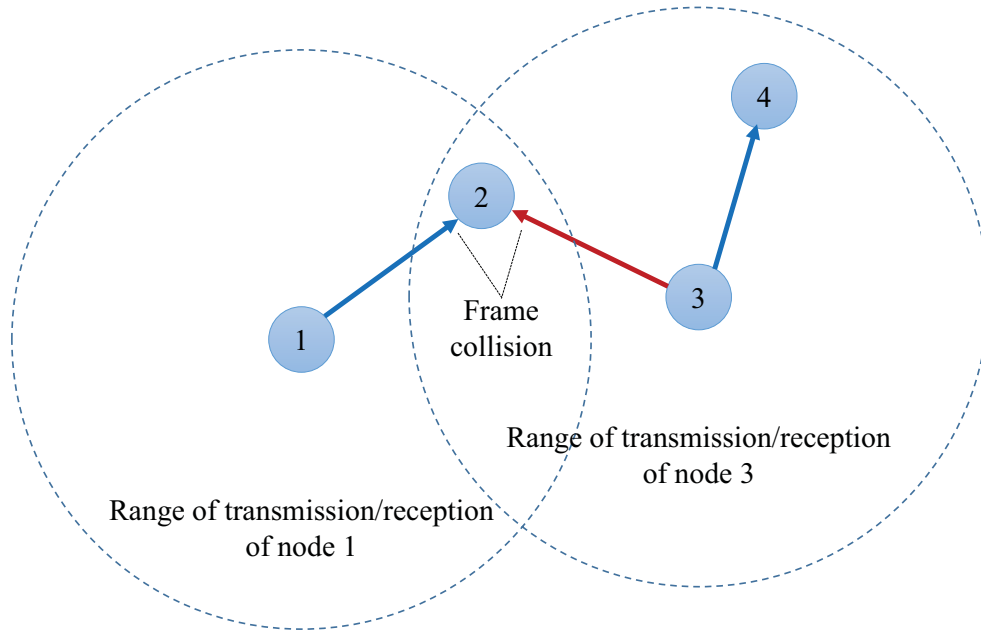


図 2.10: 隠れ端末問題

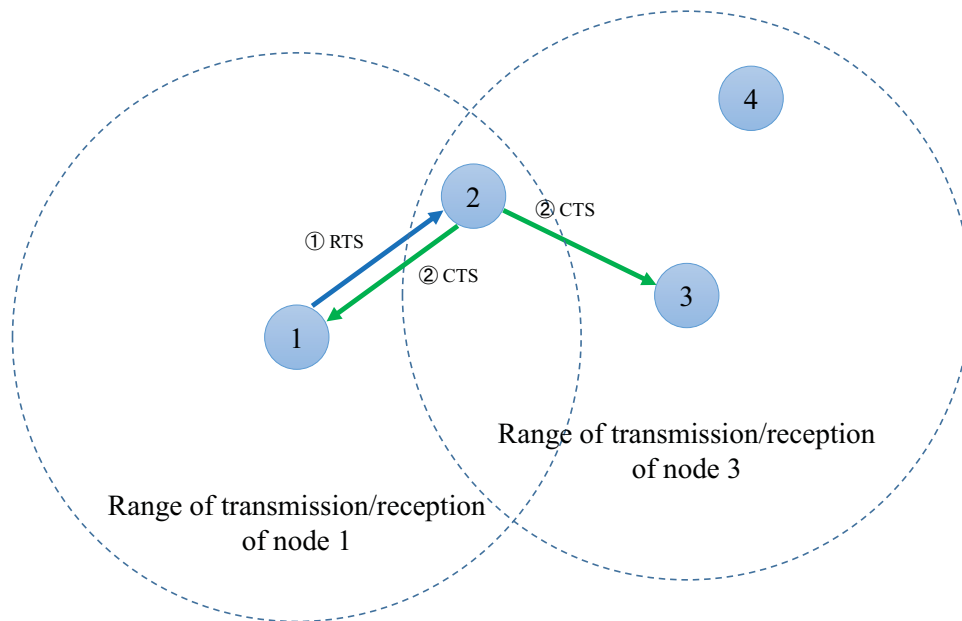


図 2.11: RTS/CTS による隠れ端末問題の回避

2.5.2 さらし端末問題

CTS/RTS 方式を利用することで、隠れ端末問題を回避することができるが、マルチホップ無線 LAN の場合では、別の問題が起こる。図 2.12 のように、端末 1 が端末 2 にデータを伝送する際に RTS/CTS フレームの交換により、端末 3 は端末 2 からの CTS フレームを受信し、端末 1 と 2 の通信が完了するまでの間に待機状態にとどまる。この時間に、端末 4 が 3 にデータを伝送すると、端末 3 は何の応答もできないため、端末 4 は再送を繰り返すことになる。このような問題はさらし端末問題と呼ばれる。さらに 3 ホップ以上のマルチホップではさらし端末問題に加え仮想キャリアセンスの制御フレームが正常に機能しないことによるフレーム衝突が頻発することが知られている。

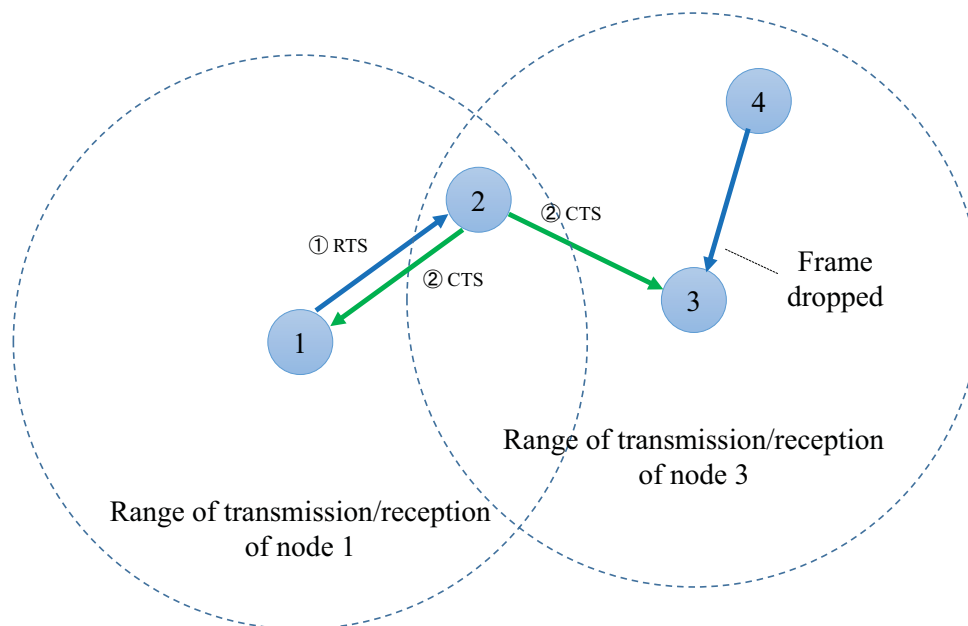


図 2.12: さらし端末問題

2.5.3 Wi-Fi テザリング

Wi-Fi を搭載したスマートフォンの普及により、外出先で無線 LAN 環境がない場所でも、携帯電話回線に接続されたスマートフォンを AP として、インターネットに接続することができる。これがいわゆる Wi-Fi テザリングである。携帯電話のデータ通信量の増大により人口密集地などで発生する速度低下や頻繁に切断されるような事態を解消するた

め、通信需要を 3G/4G 回線の代わりに、プロバイダの Wi-Fi スポットを経由でインターネットに接続する方式を「Wi-Fi オフロード」と呼ぶ。携帯電話事業者が設置した Wi-Fi アクセスポイントは、契約したスマートフォンのみが利用できることが多い。図 2.13 の示すように、Wi-Fi オフロードを行う場合、データ通信は、プロバイダの Wi-Fi アクセスポイントとユーザのスマートフォンの 2 つ（スマートフォンが中継端末の役割を果たす）を介して行われる。

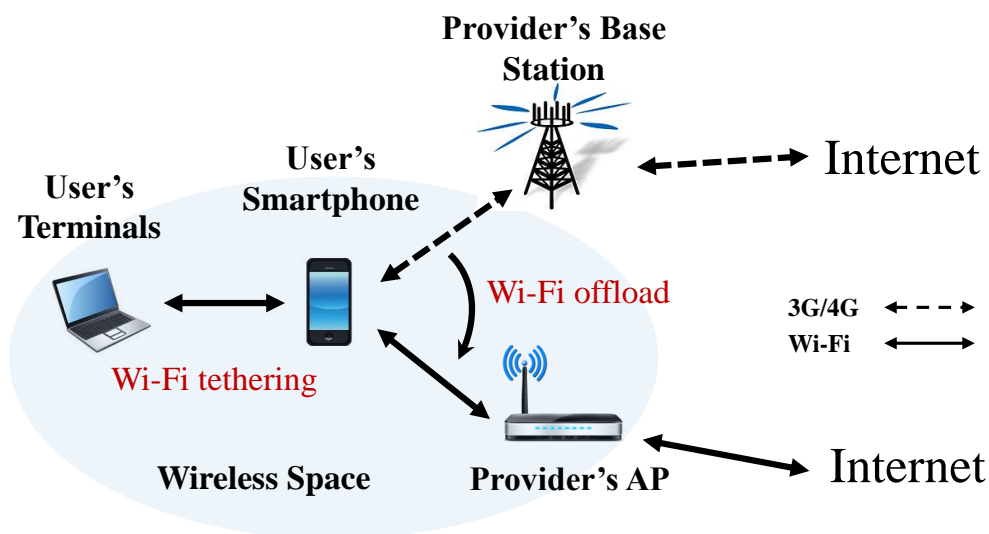


図 2.13: Wi-Fi テザリングと Wi-Fi オフロード

2.6 無線 LAN 性能評価手法に関する既存研究

IEEE 802.11 DCF の動作を厳密に解析するために、これまでに数多くの研究成果が発表されてきた [3, 6, 8–42]. その中、シングルホップ無線 LAN を対象とした多数の研究 [6, 8–20] は、2000 年に Bianchi により提案された解析モデル [3] をベースとしている。マルチホップ無線 LAN に対する解析 [21–33] は、Bianchi の解析手法の拡張や、簡略化したマクロモデルを使用した。Bianchi モデル以外の解析手法 [34–36] は、さらに一般の条件で無線 LAN の通信性能の評価を行った。それに、ビットエラーの影響を解析できるモデルも提案されている [37–42]. しかし、これらの解析モデルはそれぞれの制限があり、あらゆる無線 LAN シナリオに対応できる手法はいまだ確立されていないことが分かった。以下、本研究に関連する各既存研究の概要を述べる。

2.6.1 シングルホップ無線 LAN

シングルホップ無線 LAN の性能解析には、各端末の状態変化を詳しく記述する手法が用いられることが多い。その代表であった Bianchi の解析モデルでは、無線端末の状態をバックオフカウンタとバックオフステージの二つで表現し、状態遷移を離散時間マルコフ連鎖によりモデル化してスループット等を評価する。しかし、Bianchi モデルは、無線端末が飽和状態（常にフレームを所持している状態）にあることが仮定されているが、通常、端末は非飽和状態にある。このため、Malone らは Bianchi のモデルを改良し、非飽和状態が扱えるモデルを提案した。Malone らのモデル [6] は、バックオフカウンタとバックオフステージに加えて、フレームを所持するか否かを端末の状態表現に用いる。また、フレーム送信直後に端末が（送信待ちの）フレームを所持する確率は、過去の履歴や直前のバックオフステージの値とは独立に決まるとしている。しかし、実際には、端末の送信バッファにはフレームの待ち行列が形成されており、フレーム所持確率を正しく評価するには、このフレームの待ち行列長を把握する必要がある。Liu ら [17] は、Malone のモデルを改良し、フレームの待ち行列長を考慮できる性能解析モデルを提案した。彼らのモデルは、無線端末の状態をバックオフカウンタ、バックオフステージ、フレームの待ち行列長の三つで表現し、状態遷移を 3 次元離散時間マルコフ連鎖でモデル化するが、3 次元マルコフ連鎖の定常解がスループット等の評価に必要となり、複雑な計算が要求される。

2.6.2 マルチホップ無線 LAN

前述したモデルはいずれも端末の状態遷移を離散時間マルコフ連鎖によりモデル化した。マルチホップ無線 LAN の場合は隠れ端末問題が発生するため、より慎重な解析が必要となる。モデルの複雑化を避けるため、バックオフカウンタとバックオフステージを端末状態表現に用いることはせず、端末の動作を少数のマクロ状態に縮約し表現することで、解析を大幅に簡略化した。これらのモデルは、飽和状態のみを仮定したり、非飽和状態を扱っても（端末の状態変化と待ち行列長の変化が独立であると仮定するなど）粗い近似が用いられたりすることが多い。

一方、端末の状態遷移を連続時間マルコフ連鎖でモデル化した手法は、新たなアプローチとして検討された。Nardelli ら [32] は、端末のバックオフ時間および送信時間が指数分布に従うと仮定し、連続時間マルコフモデルを用いて、隠れ端末が存在する無線 LAN のスループット性能を閉形式解 (closed-form solution) を導出した。Bellalta らのモデル [33] は、近接した無線 LAN 間の干渉を考慮しながら、キャリアセンス範囲は部分的に重なる複数の無線 LAN それぞれの最大スループットを評価した。これらの解析は飽和状態条件

に限定されている。

2.6.3 Bianchi モデル以外の解析手法

Bianchi モデル以外の解析手法も提案された。Liew ら [34] は隠れ端末やさらし端末問題が生じる一般的なトポロジーで、飽和状態のスループットを近似で評価する手法を提案した。この手法では無線 LAN の各パラメータとスループットの関係性を明らかにすることができない。Dai ら [35] が提案したモデルは、シングルホップ無線 LAN の安定性、スループットおよび伝送遅延が 2 つの定常状態動作点に依存することを解明した。彼らの手法は端末のバッファサイズとフレーム再送の回数が無限大と仮定した。Laufer ら [36] はフレームの到着率とバックオフ時間が指数分布に従う仮定を使用せず、隠れ端末が存在を考慮したマルチホップ無線 LAN の非飽和スループットを評価した。しかし、このモデルはフレームの待ち行列長と同時送信によるフレーム衝突の確率を解析していない。

2.6.4 ビットエラーを考慮した解析モデル

ビットエラーの影響を解析するモデル [37–40] は、飽和状態条件に限定され、異なるフレームサイズを用いる端末が混在する場合の解析には適用しない。モデル [41,42] は、文献 [17] で提案された 3 次元離散時間マルコフモデルを拡張して、レイリーフェーディング通信路におけるビットエラーとキャプチャ効果の影響を評価できるが、前述したように、3 次元マルコフ連鎖の定常解を求めるために複雑な計算が強いられる。

2.6.5 既存研究のまとめ

IEEE 802.11 DCF は自律分散型のメディアアクセス制御が使用される。無線 LAN の性能を理論的に理解するために、DCF の動作を厳密にモデル化した解析が多く提案されている。しかし、2.5.3 節で紹介した Wi-Fi オフロードのような利用環境では、3 つの端末（ユーザ端末、中継端末およびプロバイダの AP）が互いに干渉し、中継端末へのフレーム到着過程が複雑なため、スループット解析は自明ではない。Bianchi モデルとその拡張版は、無線端末の状態を少なくともバックオフカウンタとバックオフステージの 2 つで表現しており、定義された端末の状態数が多く、これが解析を複雑化する 1 つの要因となっている。また、フレーム伝送遅延やバッファ溢れによるフレーム損失を考慮するためには、フレームの待ち行列長を正しく把握しておくことが重要である。

2.7 まとめ

本章では IEEE 802.11 規格に基づく無線 LAN 諸規格及び関連技術の概要について説明した。第3章では、IEEE 802.11 DCF を対象として、本研究で提案する連続時間マルコフモデルによる解析手法について述べる。

第 3 章

端末のマクロ状態表現を用いた性能評価手法

Bianchi モデルとその改良版は，無線端末の状態を少なくともバックオフカウンタとバックオフステージの 2 つで表現しており，これが解析を複雑化する 1 つの要因となっている．一方，フレーム伝送遅延時間の評価やバッファ溢れによるフレーム損失を考慮するためには，端末の内部に形成されるフレームの待ち行列長を正しく把握することが重要である．本章で述べる手法では，端末の状態をバックオフカウンタとバックオフステージの 2 つで表現する手法を放棄する．代わりに，少数のマクロ状態を定義し，端末のマクロ状態とフレームの待ち行列長の変化を連続時間マルコフ連鎖でモデル化して，定常状態確率を求める手法を提案する．

3.1 解析条件

シングルホップ無線 LAN および図 3.1 のような（スマートフォンのようなテザリング端末とラップトップなどのユーザ端末を無線 LAN で接続し，さらにテザリング端末を公衆 Wi-Fi などに接続する）2 ホップ無線 LAN を解析の対象とする．モデル化において，以下の仮定条件をおく．

1. n 台の無線端末（アクセスポイントを含む）が共通のチャンネルを介して，フレームを相互に送信する．
2. 各端末は互いにキャリアセンスできる位置にあり，いわゆる隠れ端末やさらし端末は存在しない．
3. 各端末は RTS/CTS 機能を使用しない．

4. 端末 i は最大 K_i 個のフレームを格納できる送信バッファを持つ.
5. 端末 i には率 λ_i のポアソン過程に従ってフレームが発生する (λ_i は端末の送信負荷 O_i とフレームサイズ L_i により $\lambda_i = O_i/L_i$ と表される; 本章では, 各端末のフレームサイズはすべて等しいと仮定する).

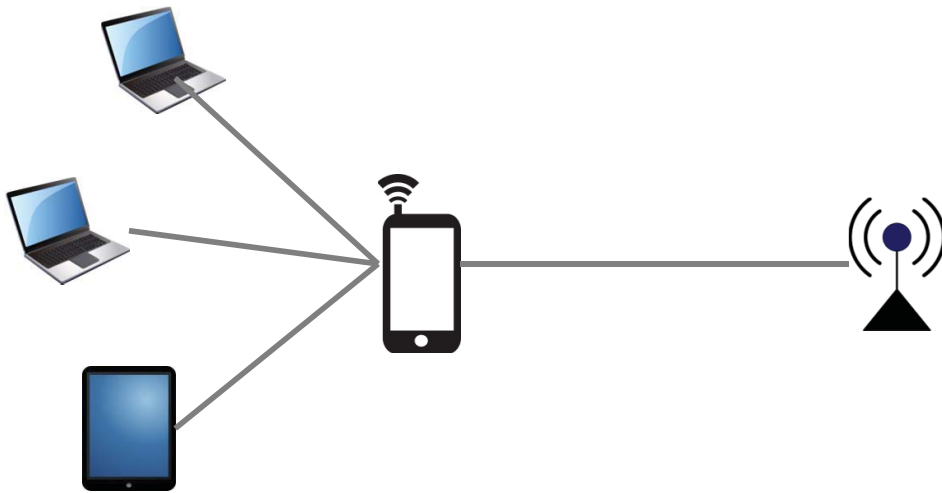


図 3.1: 2 ホップ無線 LAN: Wi-Fi オフロード

3.2 マクロ状態表現

提案する解析モデルでは, 端末の状態を以下のように分類する.

- チャンネルアイドル状態 (状態 0, 状態 0*)
- 送信状態 (状態 1, 状態 2)
- キャリアセンス状態 (状態 3, 状態 4, 状態 3*, 状態 4*)

チャンネルアイドル状態は端末がチャンネルの空きを検出中の状態を意味し, 端末はバックオフカウンタを減算している状態 (状態 0), もしくはバックオフカウンタが 0 で待機状態 (状態 0*) のいずれかにある.

送信状態とは, フレームの送信を開始してから, フレームの送信が (成功, 失敗にかかわらず) 終了してバックオフカウンタを再設定後, カウントダウンを再開するまでの状態を指し, 送信成功 (状態 1) と送信失敗 (状態 2) の 2 つの状態に分けられる. チャンネルアイドル状態にある端末は, バックオフカウンタが 0 になった時点で, 少なくとも 1 つの

送信フレームを持つ場合は、送信状態に遷移する。ポストバックオフ状態で待機している端末にフレームを到着すると、端末がキャリアセンスを行い、チャンネルがアイドルのままであれば、送信状態に遷移する。

キャリアセンス状態は他の端末がフレーム送信中の状態に対応し、送信成功をキャリアセンス中（状態 3）と送信失敗をキャリアセンス中（状態 4）の 2 つの状態を有する。なお、バックオフカウンタが 0 で待機状態（状態 0*）からキャリアセンス状態に遷移した場合は、送信成功（状態 3*）と送信失敗（状態 4*）に分類する。

3.3 連続時間マルコフ連鎖

各マクロ状態の継続時間は、端末自身のバックオフカウンタやフレーム数、および同じチャンネルを共用する他の端末の状態に依存し、その分布を厳密に求めることは困難である。そのため、本解析モデルでは、端末の各状態の継続時間は指数分布に従うとする仮定を用いることとする。この仮定のもとでは、状態間の遷移は連続時間マルコフ連鎖に従うことになる。なお、本解析モデルで用いたような指数分布の仮定（マルコフモデルに従うとする仮定）は、IEEE 802.11 システムのスループット性能などを解析的に評価する際の本質的な誤差要因とはならないことが、既存研究（[32], [34]）において示されている。また、各端末の動作（状態遷移）は本来独立ではないが、本研究では各端末の状態遷移が互いに独立であると仮定し、端末間の相互関係を平均場近似 [43, 44] により表現することで、端末ごとに定常状態確率を計算する手法を採用する。この手法は、decoupling approximation [3] もしくは fixed point analysis [10] と呼ばれ、無線 LAN の解析では広く用いられる。

時刻 t における端末 i の待ち行列長を $X_i(t)$ 、端末 i のマクロ状態を $Y_i(t)$ で表す。上述の（各状態の継続時間が指数分布に従うとする）仮定により、確率過程 $\{X_i(t), Y_i(t)\}_{t \geq 0}$ は有限状態空間上の連続時間マルコフ連鎖に従う。端末の状態遷移は待ち行列長に依存する。図 3.2 は、1 個以上の送信すべきフレームを持つ場合の状態遷移図を表したものである。図において、例えば $(k, 1)$ は、端末のキュー長（フレーム数）が k 、マクロ状態が 1 の状態を表している。矢印は状態遷移の向きを表しており、特に太線の矢印は待ち行列長の変化を引き起こす状態遷移を表す。図 3.3 は、送信すべきフレームを持たない場合の状態遷移図を表したものである。端末がポストバックオフ状態と待機状態に移行する可能性があるため、図 3.2 よりも複雑である。

図において、 ν_i および γ_i は、端末 i におけるチャンネルアイドル状態から送信状態およびキャリアセンス状態への遷移率を表している。 p_i^t は送信状態に遷移する際に、（フレーム衝突などによる）送信失敗が起こる確率である。また、 p_i^f はキャリアセンス状態に遷移する際に、他の端末同士が送信失敗する確率である。

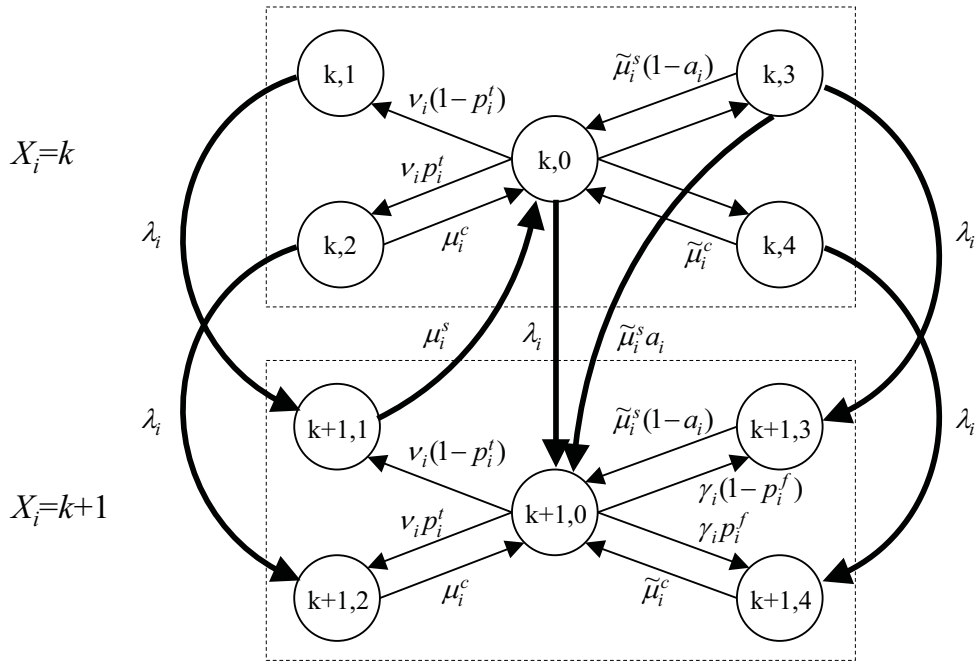


図 3.2: 状態遷移図 ($0 < k < K_i$)

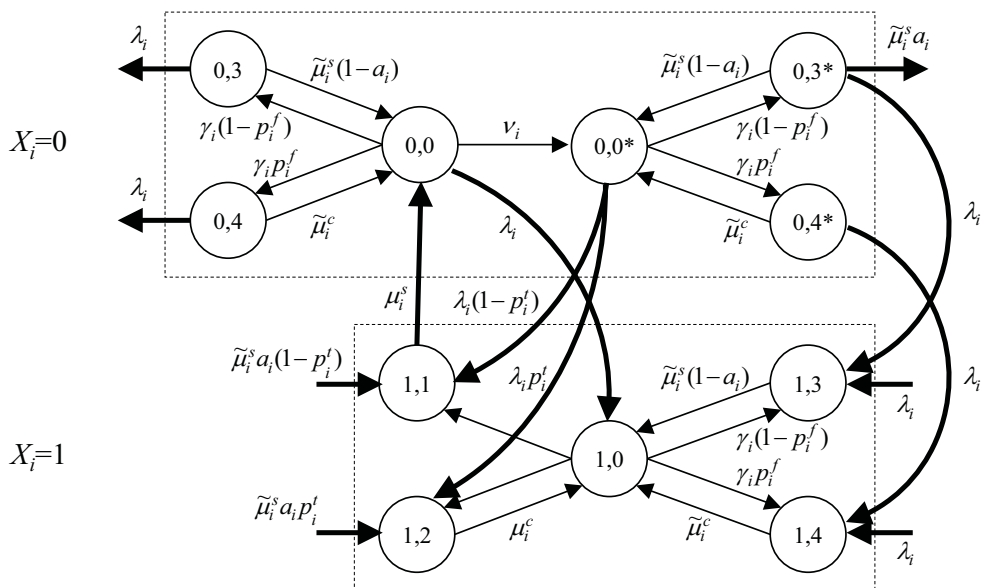


図 3.3: 状態遷移図 (ポストバックオフ)

パラメータ a_i は、端末 i がキャリアセンス状態（状態 3 と 3*）の終了時にフレームを受信する確率を表す。 a_i の値は無線 LAN のトポロジーにより決定される。シングルホップ無線 LAN では、受信したフレームが系外へ退去するため、すべての端末において a_i は 0 である。一方、図 3.1 に示した 2 ホップ無線 LAN では、他の端末から送信されたフレームが中継端末に届くため、 a_i は 1 に等しい。平衡方程式では、フレーム発生端末のフレーム送信が終了（キャリアセンス状態が終了）すると同時に、中継端末がそのフレームを受信する事象が正確に反映されている。すなわち、中継端末には端末の状態とは独立にフレームが（ポアソン過程に従って）到着するのではなく、端末の状態変化に依存してフレームが到着するようにモデル化されている。

本モデルでは、送信状態の期間長（フレーム送信を開始してから、バックオフカウンタを再設定後、カウントダウンを再開するまでの期間長）は指数分布に従うと仮定する。送信期間長は端末のフレーム送信時間に依存する。 T_{DATA} , T_{ACK} をそれぞれデータと ACK を送信するのにかかる時間とする。状態 1 と状態 3 の継続時間の期待値の逆数をそれぞれ μ_i^s および $\tilde{\mu}_i^s$ により表すこととすると、端末が送信するフレームのサイズがすべて等しい場合は

$$\mu_i^s = \tilde{\mu}_i^s = \frac{1}{T_{DATA} + SIFS + T_{ACK} + DIFS}$$

が成り立つ。また、状態 2 と状態 4 の継続時間の期待値の逆数を μ_i^c および $\tilde{\mu}_i^c$ とすると、端末が送信するフレームのサイズがすべて等しい場合は、

$$\mu_i^c = \tilde{\mu}_i^c = \frac{1}{T_{DATA} + ACK \text{ timeout} + DIFS}$$

が成り立つ。IEEE 802.11 標準 [4] には ACK timeout の期間長が定義されていないため、本研究では、 $ACK \text{ timeout} = SIFS + T_{ACK}$ とする。

なお、各端末が異なるサイズのフレームを送信する場合における、 μ_i^c , $\tilde{\mu}_i^s$, $\tilde{\mu}_i^c$ の決定法については第 5 章で説明する。

3.4 大域平衡方程式

十分時間を経過し、ネットワークが安定した定常状態での確率分布の存在を仮定すれば、初期状態と無関係に極限分布

$$\pi_i(k, l) = \lim_{t \rightarrow \infty} P(X_i(t) = k, Y_i(t) = l)$$

が存在し、定常状態確率と一致する。定常状態確率は大域平衡方程式 (3.1), (3.2), および (3.3) を満たす。平衡方程式において、 $\mathbf{1}(A)$ は A が真であれば 1, 偽であれば 0 を取る関数 (indicator 関数) である。

$0 < k < K_i$ の場合,

$$\begin{aligned}
(\lambda_i + \gamma_i + \nu_i)\pi_i(k, 0) &= \lambda_i\pi_i(k-1, 0) + \mu_i^s\pi_i(k+1, 1) \\
&\quad + \tilde{\mu}_i^s((1-a_i)\pi_i(k, 3) + a_i\pi_i(k-1, 3)) \\
&\quad + \mu_i^c\pi_i(k, 2) + \tilde{\mu}_i^c\pi_i(k, 4), \\
(\lambda_i + \mu_i^s)\pi_i(k, 1) &= \lambda_i\pi_i(k-1, 1) + \nu_i(1-p_i^t)\pi_i(k, 0) \\
&\quad + \mathbf{1}(k=1)(\lambda_i(1-p_i^t)\pi_i(0, 0^*) \\
&\quad + \tilde{\mu}_i^s(1-p_i^t)a_i\pi_i(0, 3^*)), \\
(\lambda_i + \mu_i^c)\pi_i(k, 2) &= \lambda_i\pi_i(k-1, 2) + \nu_i p_i^t \pi_i(k, 0) \\
&\quad + \mathbf{1}(k=1)(\lambda_i p_i^t \pi_i(0, 0^*) \\
&\quad + \tilde{\mu}_i^s p_i^t a_i \pi_i(0, 3^*)), \\
(\lambda_i + \tilde{\mu}_i^s)\pi_i(k, 3) &= \lambda_i\pi_i(k-1, 3) + \gamma_i(1-p_i^f)\pi_i(k, 0) + \mathbf{1}(k=1)\lambda_i\pi_i(0, 3^*), \\
(\lambda_i + \tilde{\mu}_i^c)\pi_i(k, 4) &= \lambda_i\pi_i(k-1, 4) + \gamma_i p_i^f \pi_i(k, 0) + \mathbf{1}(k=1)\lambda_i\pi_i(0, 4^*).
\end{aligned} \tag{3.1}$$

$k = 0$ の場合,

$$\begin{aligned}
(\lambda_i + \gamma_i + \nu_i)\pi_i(0, 0) &= \mu_i^s\pi_i(1, 1) + \tilde{\mu}_i^s(1-a_i)\pi_i(0, 3) + \tilde{\mu}_i^c\pi_i(0, 4), \\
(\lambda_i + \gamma_i)\pi_i(0, 0^*) &= \nu_i\pi_i(0, 0) + \tilde{\mu}_i^s(1-a_i)\pi_i(0, 3^*) + \tilde{\mu}_i^c\pi_i(0, 4^*), \\
\pi_i(0, 1) &= \pi_i(0, 2) = 0, \\
(\lambda_i + \tilde{\mu}_i^s)\pi_i(0, 3) &= \gamma_i(1-p_i^f)\pi_i(0, 0), \\
(\lambda_i + \tilde{\mu}_i^s)\pi_i(0, 3^*) &= \gamma_i(1-p_i^f)\pi_i(0, 0^*), \\
(\lambda_i + \tilde{\mu}_i^c)\pi_i(0, 4) &= \gamma_i p_i^f \pi_i(0, 0), \\
(\lambda_i + \tilde{\mu}_i^c)\pi_i(0, 4^*) &= \gamma_i p_i^f \pi_i(0, 0^*).
\end{aligned} \tag{3.2}$$

$k = K_i$ の場合,

$$\begin{aligned}
(\gamma_i + \nu_i)\pi_i(K_i, 0) &= \lambda_i\pi_i(K_i-1, 0) + \tilde{\mu}_i^s\pi_i(K_i, 3) \\
&\quad + \mu_i^c\pi_i(K_i, 2) + \tilde{\mu}_i^c\pi_i(K_i, 4) \\
&\quad + a_i\tilde{\mu}_i^s\pi_i(K_i-1, 3), \\
\mu_i^s\pi_i(K_i, 1) &= \lambda_i\pi_i(K_i-1, 1) + \nu_i(1-p_i^t)\pi_i(K_i, 0), \\
\mu_i^c\pi_i(K_i, 2) &= \lambda_i\pi_i(K_i-1, 2) + \nu_i p_i^t \pi_i(K_i, 0), \\
\tilde{\mu}_i^s\pi_i(K_i, 3) &= \lambda_i\pi_i(K_i-1, 3) + \gamma_i(1-p_i^f)\pi_i(K_i, 0), \\
\tilde{\mu}_i^c\pi_i(K_i, 4) &= \lambda_i\pi_i(K_i-1, 4) + \gamma_i p_i^f \pi_i(K_i, 0).
\end{aligned} \tag{3.3}$$

大域平衡方程式は，端末内部のフレームの待ち行列長に依存する．例えば，式 (3.1) は，図 3.2 に示した条件 ($0 < k < K_i$) で成立する大域平衡方程式を表している．端末にフレームが新たに発生するか，もしくは新たにフレームを受信すれば，状態 (k, l) から状態 $(k+1, l')$ に遷移する．式 (3.2) は，図 3.3 に示した条件 ($k=0$) で成立する大域平衡方程式を表しており，通常のバックオフ状態とポストバックオフ状態 (0^* , 3^* , 4^*) 間の遷移が考慮されている．式 (3.3) は送信バッファが満杯状態 ($k=K_i$) の大域平衡方程式を表しており，状態 (k, l) から状態 $(k+1, l')$ への遷移は存在しない．定常状態確率は大域平衡方程式から解析的に求まる．定常状態確率の導出法については，付録 A を参照のこと．

定常状態では，端末 i が成功に送信する状態（状態 1）にいる確率 $\sum_{k=1}^{K_i} \pi_i(k, 1)$ が得られれば，端末 i のスループット S_i は以下のように求まる．

$$S_i = \mu_i^s L_i^0 \pi_i^{(1)}, \quad \pi_i^{(1)} \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{k=1}^{K_i} \pi_i(k, 1). \quad (3.4)$$

ここで， L_i^0 は端末 i の平均フレームサイズである．平均待ち行列長は次で与えられる．

$$E[Q_i] = \sum_{k=1}^{K_i} \sum_{l=0}^4 k \pi_i(k, l).$$

3.5 未知パラメータの導出方法

この節では，平衡方程式に含まれる未知パラメータの求め方を説明する．

3.5.1 キャリアセンス状態への遷移率

キャリアセンス状態への遷移率 γ_i は，端末 i 以外の端末の状態に依存する．平衡方程式から，以下の式が得られる．

$$\tilde{\mu}_i^s \pi_i^{(3)} = \gamma_i (1 - p_i^f) \pi_i^{(0)}, \quad (3.5)$$

$\pi_i^{(3)}$ と $\pi_i^{(0)}$ は，それぞれ端末 i が (他の端末が送信成功中の) キャリアセンス状態とチャネルアイドル状態にいる確率を表す．

$$\begin{aligned} \pi_i^{(3)} &\stackrel{\text{def}}{=} \pi_i(0, 3^*) + \sum_{k=0}^{K_i} \pi_i(k, 3), \\ \pi_i^{(0)} &\stackrel{\text{def}}{=} \pi_i(0, 0^*) + \sum_{k=0}^{K_i} \pi_i(k, 0). \end{aligned}$$

端末 i が状態 3 にあるならば、端末 i のキャリアセンス範囲内に、 i 以外任意の 1 台の端末が送信成功状態（状態 1）にある。したがって、

$$\begin{aligned}\pi_i^{(3)} &= P\left(\bigcup_{j \neq i} \{\text{node } j \text{ in state 1}\}\right) \\ &= \sum_{j \neq i} P(\text{node } j \text{ in state 1}) = \sum_{j \neq i} \pi_j^{(1)}.\end{aligned}\quad (3.6)$$

式 (3.5) と式 (3.6) により

$$\gamma_i = \frac{\tilde{\mu}_i^s \sum_{j \neq i} \pi_j^{(1)}}{(1 - p_i^f) \pi_i^{(0)}}.\quad (3.7)$$

3.5.2 フレーム送信失敗率

フレーム送信が失敗する原因は、複数の端末の同時送信によるフレーム衝突とビットエラーによるフレーム損失に分けられる。この章では、フレーム送信の失敗はフレーム衝突により発生するものとする。端末 i がフレームの送信開始時刻を 0 とすると、期間 $[0, T_s]$ (T_s はスロットタイム時間) に他のいずれかの端末が送信を試みると衝突が発生する。フレーム送信事象はポアソン過程に従って発生すると仮定すると、端末 j のチャネルアイドル状態でのフレーム送信レート r_j （単位時間あたりの平均フレーム送信回数）は以下の式で与えられる。

$$r_j = \frac{\lambda_j \pi_j(0, 0^*) + \sum_{k=1}^{K_j} \nu_j \pi_j(k, 0)}{\pi_j(0, 0^*) + \sum_{k=0}^{K_j} \pi_j(k, 0)}.$$

期間 $[0, T_s]$ に端末 j が送信を開始する事象は A_j とする。この期間に端末 j が送信しない確率は $P(A_j^c) = 1 - P(A_j) = e^{-r_j T_s}$ で表すことができる。よってフレーム衝突率 p_i^t は

$$p_i^t = 1 - P\left(\bigcap_{j \neq i} A_j^c\right) = 1 - \prod_{j \neq i} P(A_j^c) = 1 - e^{-\sum_{j \neq i} r_j T_s}.\quad (3.8)$$

また、 p_i^f は、端末 i がキャリアセンス状態にいるという条件のもとで、端末 i 以外の端末の送信に失敗する確率であり、以下の式で与えられる。

$$p_i^f = 1 - \frac{\sum_{j \neq i} P(A_j \cap (\cup_{k \neq i, j} A_k^c))}{P(\cup_{j \neq i} A_j)},$$

ここで、

$$P(A_j \cap (\cup_{k \neq i, j} A_k^c)) = (1 - e^{-r_j T_s}) e^{-\sum_{k \neq i, j} r_k T_s},$$

$$P\left(\bigcup_{j \neq i} A_j\right) = 1 - P\left(\bigcap_{j \neq i} A_j^c\right) = 1 - e^{-\sum_{j \neq i} r_j T_s}.$$

よって,

$$p_i^f = 1 - \frac{\sum_{j \neq i} e^{-\sum_{k \neq i; j} r_k T_s} (1 - e^{-r_j T_s})}{1 - e^{-\sum_{j \neq i} r_j T_s}}. \quad (3.9)$$

3.5.3 送信状態への遷移率

端末 i がチャネルアイドル状態で送信状態への遷移率 ν_i は, 平均バックオフ時間の逆数に相当する. フレーム衝突によるフレーム再送時にバックオフ時間の指数増大を考慮すると, 以下で計算する.

$$\nu_i^{-1} = (1 - p_i^t) \sum_{n=0}^{n_{max}} (p_i^t)^n CW(n)/2, \quad (3.10)$$

$$CW(n) \stackrel{\text{def}}{=} \min \{2^n (CW_{min} + 1), CW_{max} + 1\} - 1,$$

n_{max} は最大バックオフステージである.

3.5.4 数値計算手順

平衡方程式に定常状態確率に依存するパラメータ ($\gamma_i, \nu_i, p_i^t, p_i^f$) が含まれているため, 定常状態確率とこれらパラメータが自己無矛盾に決定されるように, 繰り返し計算が必要になる. まずパラメータに適当な初期値 (0 など) を与え, 平衡方程式を解いて定常状態確率を求める. 続いて, パラメータを再決定し, その結果を解いて平衡方程式に代入して定常状態確率を再計算する. これを収束するまで繰り返す. 収束は早く, 計算時間は数秒程度以下に収まる.

3.6 数値評価

提案モデルの有効性を検証するため、3つのシナリオに対して、理論解析とシミュレーションによる検証を実施した。シナリオ1は、シングルホップ無線LANシナリオを考える。シナリオ2とシナリオ3は、図3.1に示した2ホップ無線LANシナリオを考える。各端末が802.11a規格に準じる無線LANのMAC層を使用する。表3.1にはシミュレーションの条件を示す。

シミュレーション実験は、C言語で作成された時間駆動型 (Time-driven) シミュレータを使用した。シミュレータは、IEEE 802.11 DCF 機能を実装したものである。各端末がスタティックルーティングを使用し、端末の状態 (例えば、バックオフカウンタや待ち行列長など) が1マイクロ秒の時間間隔で更新される。ソースファイルは [45] で入手できる。

表 3.1: シミュレーション条件

DataRate (R_{data})	54 Mbps
BasicRate (R_{ack})	6 Mbps
SIFS	16 μs
DIFS	34 μs
SlotTime (T_s)	9 μs
CW _{min}	15
CW _{max}	1023
RetryLimit	7
FrameSize (L_i)	1500 bytes
BufferSize (K_i)	100 frames

3.6.1 シナリオ 1：シングルホップ無線 LAN

まず、最も一般的な無線 LAN トポロジーであるシングルホップ無線 LAN シナリオを考える。n 台の無線端末は 1 つの AP に接続する (図 3.4 (a))、もしくはそれぞれの AP に接続する (図 3.4 (b))。各端末は等量の送信負荷で片方向の送信 (端末 → AP) を行う。

図 3.5 に、無線端末台数を 1 から 30 まで変えて、飽和状態で無線 LAN の総スループット (端末ごとのスループット × 端末台数) と端末数の関係を示す。キャリアセンス範囲内に、送信端末の数が増加すると、全体的のスループットが減少していく原因は、図 3.6 に示すように、端末間の同時送信による送信衝突率は端末数に正の相関があるからである。理論解析とシミュレーションの結果は良く一致しており、提案モデルは 802.11 DCF の動作を簡略化して表現しているにもかかわらず、Bianchi モデルと同程度の精度を有することが確認された。

図 3.7 に、無線端末の台数を 8 台に固定し、各端末の送信負荷を低負荷の状態から飽和状態になるまで徐々に増加した場合の、各端末の平均待ち行列長を示す。図に示すように、送信負荷が低負荷 (0~2Mbps) および高負荷 (3.5Mbps 以降) の状態では、提案モデルによる非飽和状態での端末の平均待ち行列長の結果は、シミュレーション結果と良く一致している。送信負荷が 2~3.5Mbps の間に、理論解析の結果は過小評価になっている。

提案モデルでは、平均場近似を適用し、各端末の待ち行列長をそれぞれ独立で計算する手法を用いた。実際には、各端末の待ち行列長は相互に依存している。例えば、一つの端末の待ち行列が形成されると、他の端末の待ち行列も形成される確率が高いである。平均場近似を用いたことにより、端末間の待ち行列長の正の相関が考慮されていないため、過小評価の結果となった。端末が飽和状態に移行すると、待ち行列長の相関性が弱くなるため、平均場近似による誤差が軽減していく。しかし、全体的に見ると、解析の精度が高いと考えられる。

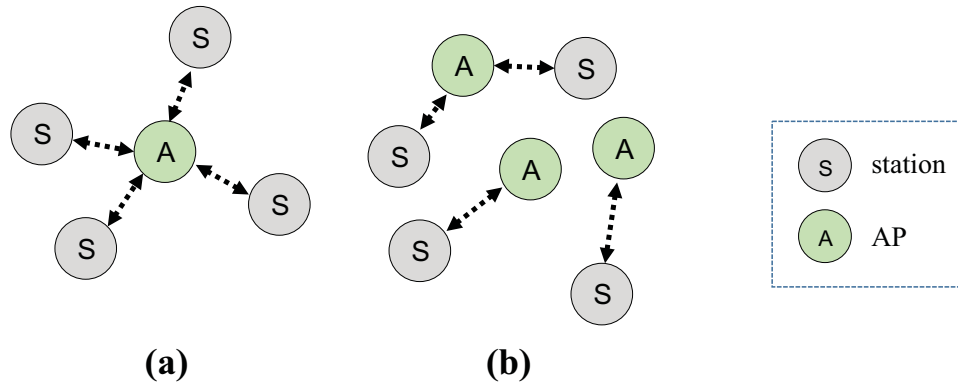
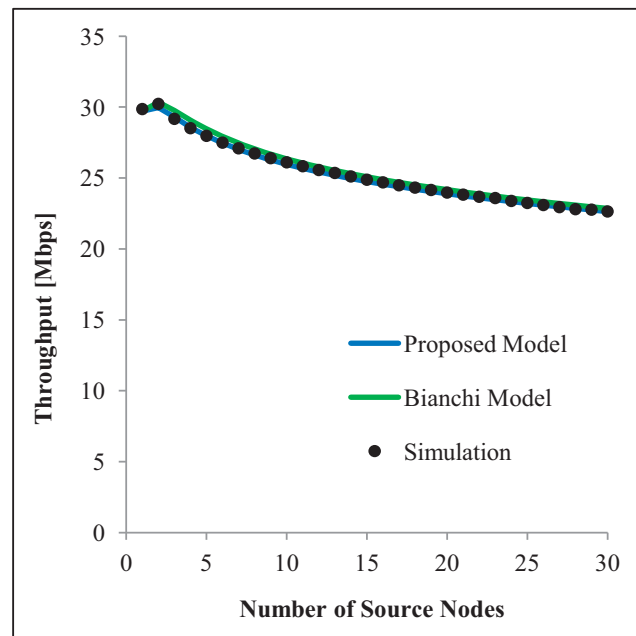


図 3.4: シングルホップ無線 LAN

図 3.5: 総スループット ($S_i \times n$)

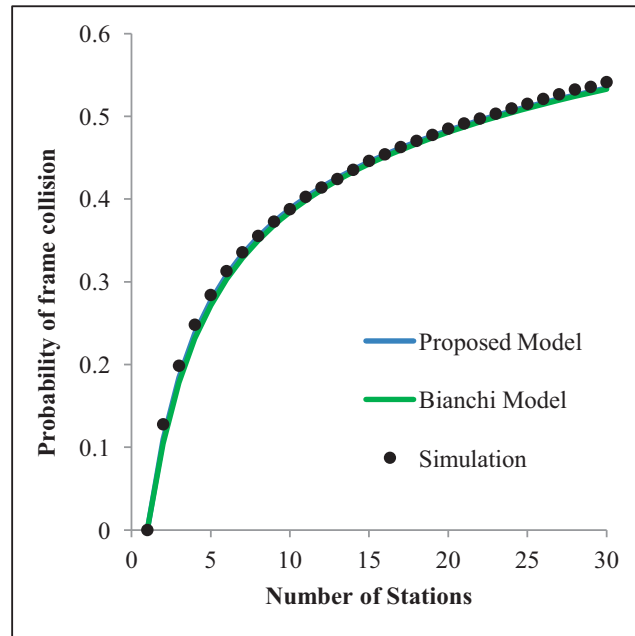
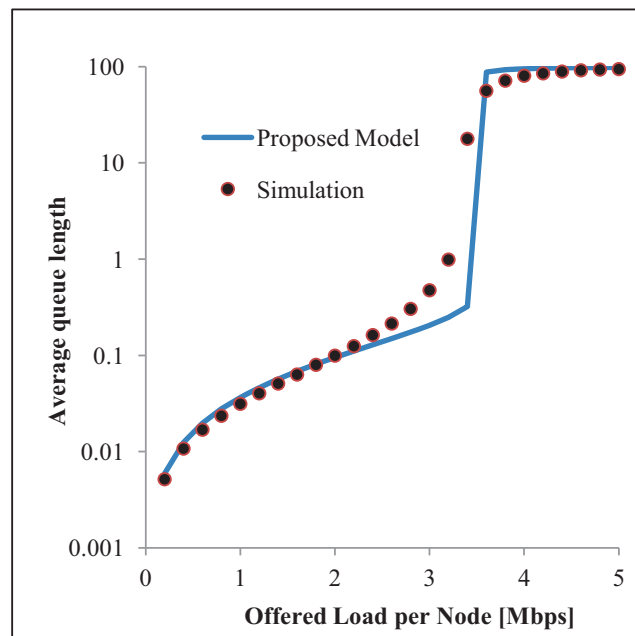
図 3.6: 各端末の送信衝突率 (p_i^t)

図 3.7: 非飽和状態で各端末の平均待ち行列長

3.6.2 シナリオ 2：送信負荷が対称の場合

マルチホップ無線 LAN では、通信トラフィックはネットワークの端から端までデータフローの形で伝送されるため、フローごとの通信性能を評価する必要がある。図 3.1 に示した 2 ホップ無線 LAN にユーザ端末 1 台が存在するシナリオにおいて、上りフロー（ユーザ端末 → AP）と下りフロー（AP → ユーザ端末）の通信量が等しいとして ($\lambda_1 = \lambda_3$)、無線 LAN の総負荷（ユーザ端末と AP が発生したデータ量の和）を低負荷から輻輳を生じる状態（飽和状態）まで徐々に増加させながら、上りと下りの各フローそれぞれのスループットと各端末の平均待ち行列長を評価する。

フローごとのスループットを示した結果を図 3.8 に示す。横軸は無線 LAN の総通信負荷を表す。ここでは、上りフローと下りフローの通信量の総和を 1 Mbps から 30 Mbps まで増加させている。実線はモデルの結果、点のプロットはシミュレーションによる結果である。図に示すように、通信負荷（通信量）が 15 Mbps になった際に、中継端末の送信バッファが飽和状態になり、バッファ溢れによるフレーム損失が発生している。この時点において、各フローのスループットは最大値に達する。通信負荷がさらに増加すると、フレーム衝突が頻繁に起きるようになり、スループットは徐々に減少する。通信負荷が 20 Mbps 以降では、すべての端末が飽和状態になったため、各フローのスループットが約 10 Mbps で一定となる。

各端末の平均待ち行列長の結果を図 3.9（中継端末）と図 3.10（ユーザ端末と AP）に示す。通信負荷が 15 Mbps になった時点で中継端末は平均待ち行列長が急激に増大し、飽和状態に移行する。通信負荷が 20 Mbps になった時点で全端末の送信バッファはほぼ一杯になる。無線 LAN のスループット性能が低下する原因は、無線端末同士が同時送信によるフレーム衝突とバッファ溢れによるフレーム損失の 2 つである。無線 LAN の負荷が高くなるとフレーム衝突率が増大するだけでなく、連続衝突によるバックオフ時間の指数増大が生じて、送信バッファのキュー長が増加し、フレーム送信の平均遅延も増大する。提案モデルは、この両方の効果を考慮して、端末が飽和状態（混雑状態）になるタイミングを正確に予測できる。

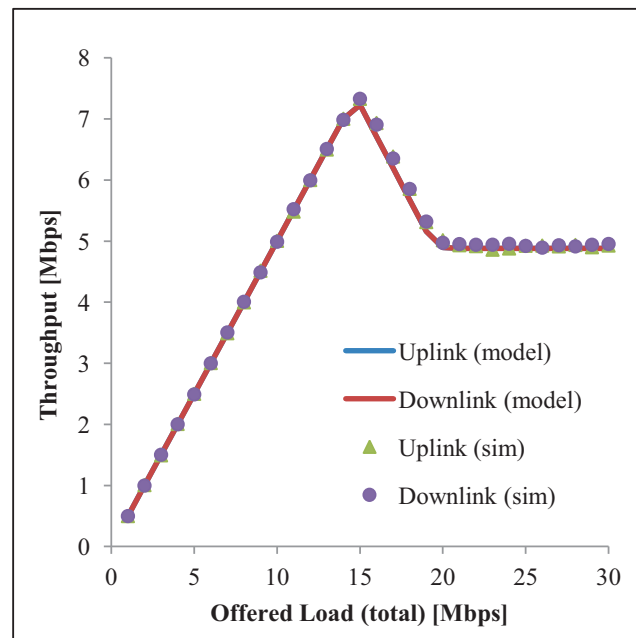


図 3.8: フローごとのスループット

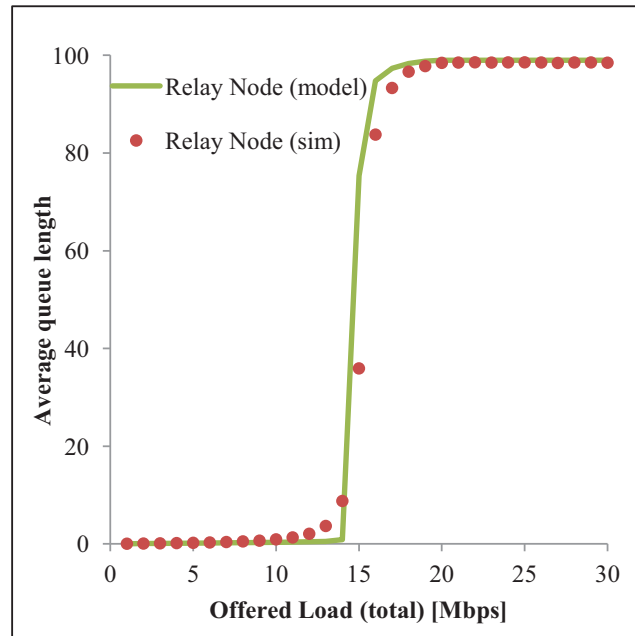


図 3.9: 平均待ち行列長 (中継端末)

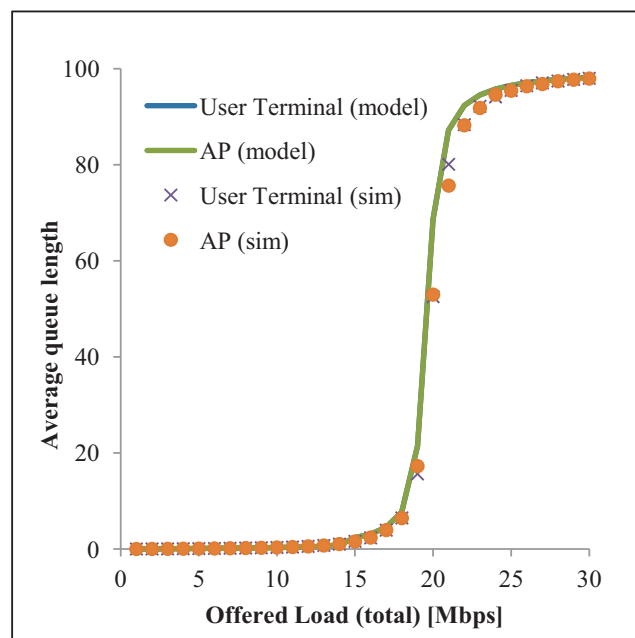


図 3.10: 平均待ち行列長 (ユーザ端末と AP)

3.6.3 シナリオ 3：送信負荷が非対称の場合

一般に、上り方向のフローの通信量と下り方向のフローの通信量は非対称である。シナリオ 3 では、上り方向の通信量に対して下り方向の通信量を 2 倍 ($2\lambda_1 = \lambda_3$) に設定し、無線 LAN の負荷を低負荷から飽和状態まで徐々に増加させながら、フローごとのスループットと各端末の平均待ち行列長を評価する実験を行った。

図 3.11 に示すように、通信負荷（通信量）が 15 Mbps までは無線 LAN は非飽和状態であり、各フローのスループットは通信量の増加とともに徐々に増加する。通信量が 15 Mbps になった時点で、中継端末の送信バッファが飽和状態になり、バッファ溢れによるフレーム損失が発生する。通信量がさらに増加すると、端末間の同時送信によるフレーム衝突が頻繁に生じ、各フローのスループットが同時に減少する。通信負荷が 18 Mbps 前後で、送信負荷が高い AP が先に飽和状態に移行し、ユーザ端末はまだ非飽和状態にある。そのため、下りフローのスループットは継続して低下するが、上りフローは再び増加している。通信負荷が 30 Mbps になると、すべての端末が飽和状態になり、上りフローと下りフローのスループットは約 5 Mbps に収束した。

各端末の平均待ち行列長の結果が図 3.12（中継端末）と図 3.13（ユーザ端末と AP）に示す。各端末が飽和状態に移行するタイミングを確認できる。

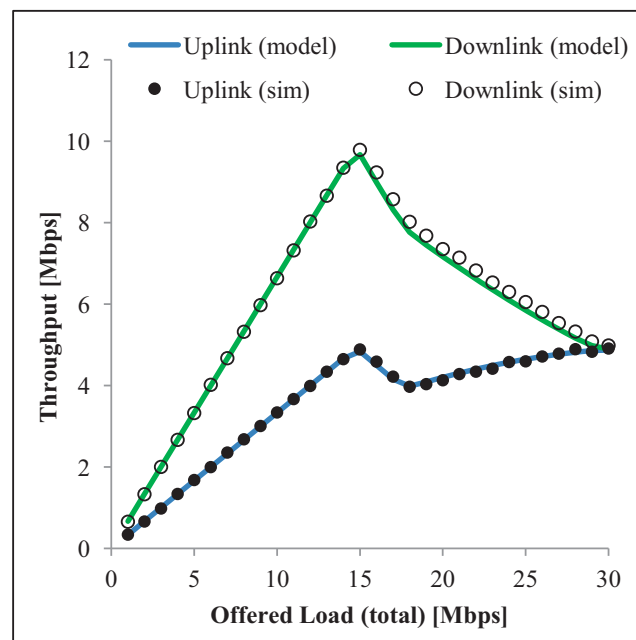


図 3.11: フローごとのスループット

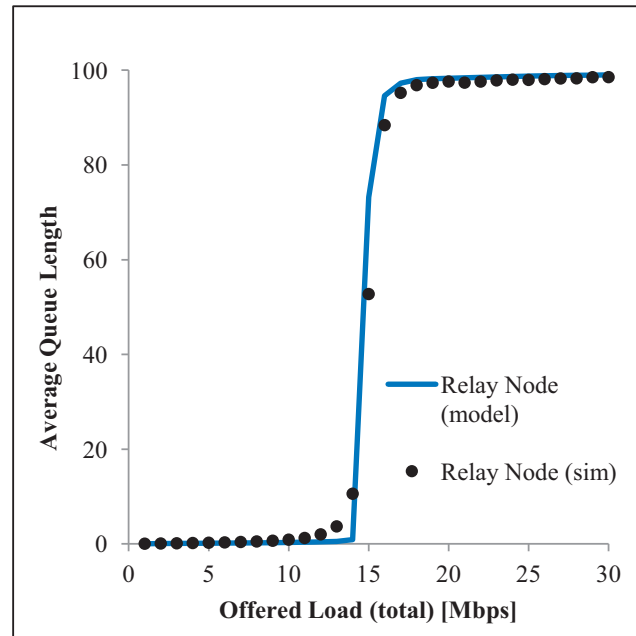


図 3.12: 平均待ち行列長 (中継端末)

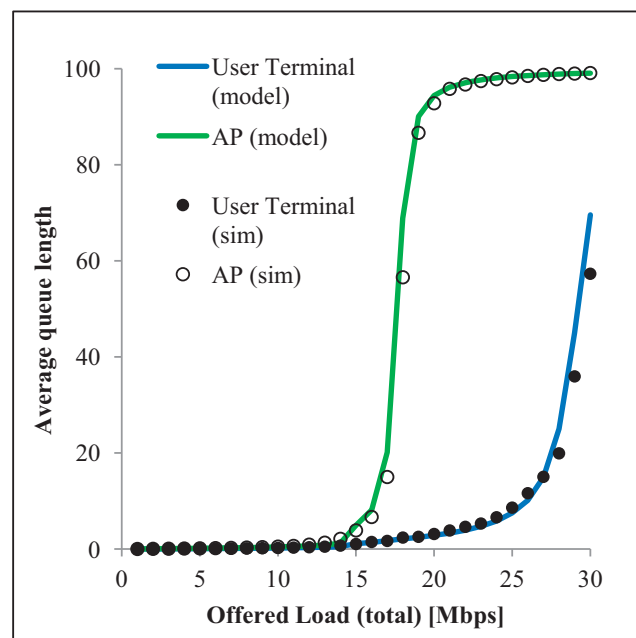


図 3.13: 平均待ち行列長 (ユーザ端末と AP)

3.7 まとめ

本章では、IEEE 802.11 DCF 無線 LAN のスループット等の性能を、解析的に評価する手法を示した。提案手法は、IEEE 802.11 DCF の動きを連続時間マルコフ連鎖で解析する手法であるが、その際に端末の状態を少数のマクロ状態（チャンネルアイドル状態、送信状態、キャリアセンス状態）に縮約して表現することで、状態数の増大を抑え、各端末の内部に形成されるフレームの待ち行列長の変化も同時に解析することを可能としている点に特徴がある。また、端末間の相互関係を平均場近似により表現することで、端末ごとに定常状態確率を計算する手法を用いた。以上のアプローチにより、従来、難解であった非飽和状態におけるフレーム待ち行列長の解析が容易になることを示した。数値評価により、解析モデルで用いた指数分布の仮定（マルコフモデルに従うとする仮定）は、IEEE 802.11 システムのスループット性能などを解析的に評価する際の本質的な誤差要因とはならないことを確認した。第4章では、提案モデルの解析手法を用いて、テザリングユーザが密集する環境における性能評価法について述べる。

第 4 章

テザリングユーザ密集環境における 性能評価法

近年、モバイルルータやスマートフォンなど、携帯電話回線や WiMAX などの無線通信技術を用いる無線デバイスがモバイル AP として使用され、Wi-Fi テザリングの利用シーンが増えている。そのため、狭いエリアで複数のテザリングユーザが一時的に近接することが現れている。無線チャンネルは限られた資源である。2.4GHz 帯を利用する 802.11g と 802.11b では、互いに影響を受けずに同時に利用できる無線チャンネルは高々 4 つしかない。テザリングユーザが高密度に集中した結果、複数の近い距離にある無線 LAN が必然的に同じチャンネルを共有することになる。無線 LAN では、各端末がチャンネルの使用状況に応じて自律分散的にフレーム送信タイミングを決定する DCF を使用する。隣接する無線端末との位置関係により、無線 LAN のスループット性能を大きく影響する可能性がある。本章では、テザリングユーザ密集環境における無線 LAN のスループット性能を解析的に評価する。

4.1 対象モデル

図 4.1 に示したシナリオを考える。 N 人のユーザがそれぞれのスマートフォンとタブレット端末を Wi-Fi で接続し、携帯回線経由でタブレット端末をインターネットに接続している。簡単のため、各ユーザの通信は全て下り方向（インターネット→スマートフォン→タブレット端末）であるとする。ユーザは直線上に並び、隣り合うユーザ同士は同じ無線チャンネル（もしくは互いに干渉する関係のチャンネル）を共用するとする。例えば、ユーザ i のスマートフォン（以下、端末 i ）のキャリアセンス範囲内に端末 $i+1$ と端末 $i-1$ が存在し、端末 i の送信を端末 $i+1$ と端末 $i-1$ は検知できるが、端末 $i+1$ と $i-1$ は互いにキャリアセンスできない位置関係（隠れ端末関係）にあるとする。

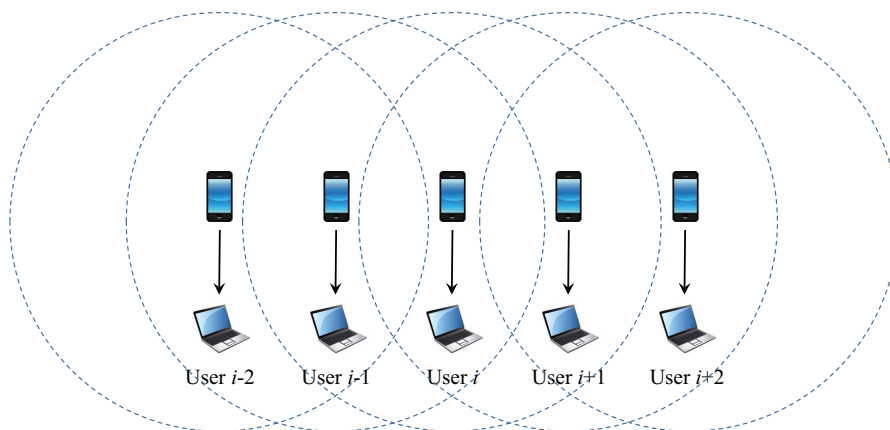


図 4.1: AP 密集環境でユーザ間の干渉

第 3 章で構築した解析モデルは、各端末のキャリアセンス範囲は十分に広いとし、ある時刻で、高々 1 台の端末が送信成功状態にあると仮定している。しかし、図 4.1 に示したシナリオでは、端末 i のキャリアセンス状態では端末 $i+1$ か端末 $i-1$ が送信状態にあるが、端末 $i+1$ の送信期間は端末 $i-1$ の送信期間と重なる可能性がある。このため、端末 $i+1$ の送信期間終了を待たずに端末 $i-1$ の送信期間が始まり、また端末 $i-1$ の送信期間の終了を待たずに端末 $i+1$ の送信期間が始まる、というように端末 i のキャリアセンス期間に端末 $i-1$ と端末 $i+1$ の多数の送信期間が含まれる可能性がある。加えて、各送信期間は送信に成功している場合と失敗している場合の両方を含みうる。従って、端末 i のキャリアセンス期間が、他の端末の送信成功状態に対応しているものなのか、送信失敗状態に対応しているものなのかを明確に区別することができない。

このような隠れ端末問題などが生じる一般的なトポロジー条件の無線 LAN のスループット性能を、Bianchi モデルもしくはその拡張モデルで計算することは事実上不可能なため、Liew らは BoE (Back of Envelope) 法を提案した [34]。この手法では Wi-Fi 同士の競合関係 (キャリアセンスできるかどうか) により競合グラフを作成し、通信リンクの最大独立集合 (Maximum Independent Sets: MISs) を用いて、無線 LAN の飽和スループットを簡易に予測でき、特に中小規模 (Wi-Fi 数が 100 以下) で複雑なネットワークトポロジーにおいて有効性を示した。しかし、BoE 法は無線 LAN プロトコルに使用する各パラメータを厳密に考慮されておらず、飽和状態のみの近似的なスループットしか評価できないといった問題点がある。

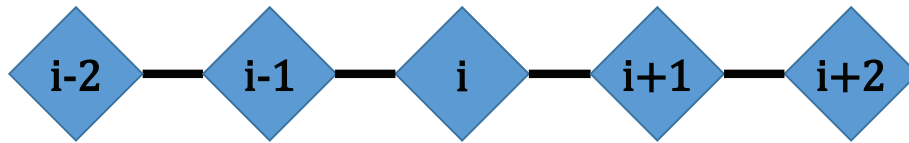


図 4.2: 競合グラフ

4.2 解析条件

モデル化において、図 4.1 に示したユーザ間の競合関係は図 4.2 のグラフで表示できる。グラフの頂点は各ユーザ端末を表し、相互にキャリアセンスできる端末は辺で結ばれる。なお、以下の仮定条件をおく。

1. 端末 i は最大 K_i 個のフレームを格納できる送信バッファを持つ。
2. 端末 i には到着率 λ_i のポアソン過程に従って、フレームが（インターネットから携帯回線経由で）到着する。
3. 各端末は RTS/CTS 機能を使用しない。

4.3 状態遷移

前述した隠れ端末の影響を考慮した上、3.2 節で定義された DCF のマクロ状態表現を以下のように修正する。

- チャンネルアイドル状態 (状態 0, 状態 0*)
- 送信状態 (状態 1, 状態 2)
- キャリアセンス状態 (状態 3, 状態 3*)

本章のモデルでは、キャリアセンス状態を送信成功と送信失敗の 2 状態に分けない点に注意する。時刻 t での端末 i の待ち行列長を $X_i(t)$ 、端末 i のマクロ状態を $Y_i(t)$ により記述する。第 3 章のモデルと同様に、各状態の継続時間は指数分布に従うことを仮定すると、確率過程 $\{X_i(t), Y_i(t)\}_{t \geq 0}$ は有限状態空間上の連続時間マルコフ連鎖に従う。端末の状態遷移は待ち行列長に依存する。図 4.3 には、少なくとも 1 個の送信すべきフレームを持つ場合での状態遷移図を示す。図 4.4 に、非飽和状態で送信すべきフレームを持たない場合の状態遷移図を示す。

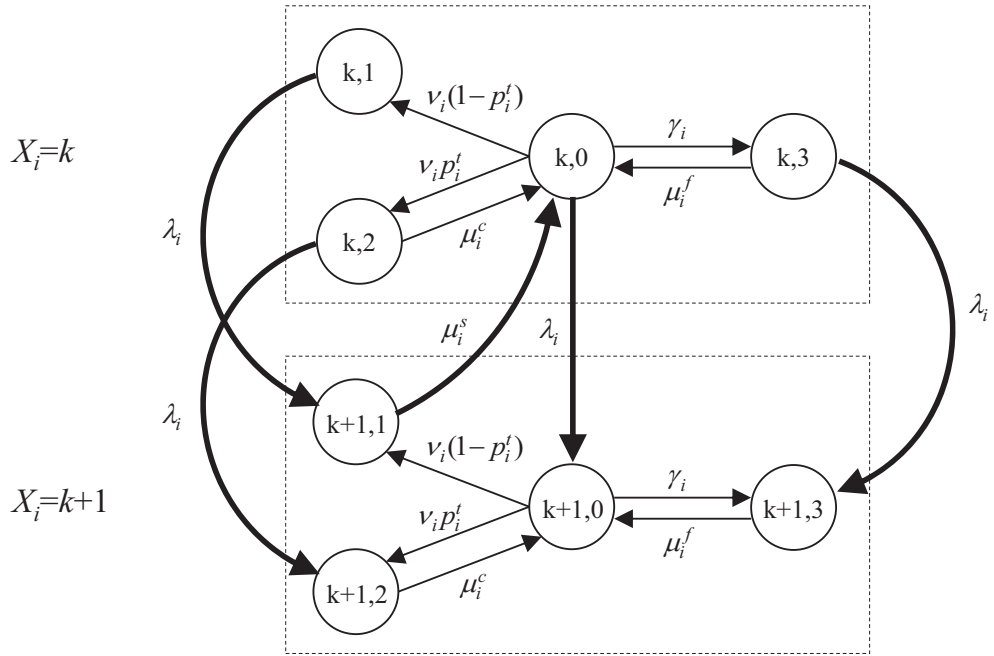


図 4.3: 状態遷移図 ($0 < k < K_i$)

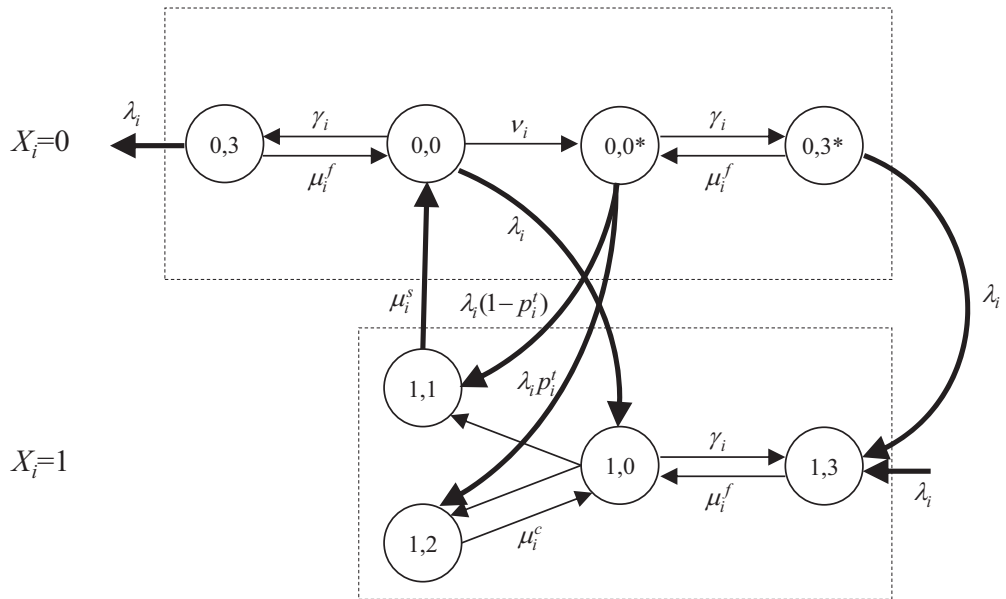


図 4.4: 状態遷移図 (ポストバックオフ)

端末 i において、チャンネルアイドル状態 (状態 0, 状態 0^*) からは、送信状態およびキャリアセンス状態へ遷移し、その遷移率はそれぞれ ν_i および γ_i とする。 p_i^t は送信状態に遷移する際に、フレーム衝突が起こる確率である。状態 1 の継続時間は送信成功する場合のフレーム処理時間長に等しく、平均 $1/\mu_i^s$ の指数分布に従う。状態 2 の継続時間は送信失敗する場合のフレーム処理時間長である。その期間長は平均 $1/\mu_i^c$ の指数分布に従う。状態 3 の継続時間は、平均 $1/\mu_i^f$ の指数分布に従うとする。マルコフ連鎖が既約で再帰的であれば、十分長い時間経過後に、初期状態に依存しないある極限分布

$$\pi_i(k, l) = \lim_{t \rightarrow \infty} P(X_i(t) = k, Y_i(t) = l)$$

に収束し、極限分布は定常状態と一致する。定常状態は大域平衡方程式 (4.1), (4.2) と (4.3) を満たす。

$0 < k < K_i$ の場合,

$$\begin{aligned} (\lambda_i + \gamma_i + \nu_i)\pi_i(k, 0) &= \lambda_i\pi_i(k-1, 0) + \mu_i^s\pi_i(k+1, 1) + \mu_i^c\pi_i(k, 2) + \mu_i^f\pi_i(k, 3), \\ (\lambda_i + \mu_i^s)\pi_i(k, 1) &= \lambda_i\pi_i(k-1, 1) + \nu_i(1 - p_i^t)\pi_i(k, 0) + \mathbf{1}(k=1)\lambda_i(1 - p_i^t)\pi_i(0, 0^*), \\ (\lambda_i + \mu_i^c)\pi_i(k, 2) &= \lambda_i\pi_i(k-1, 2) + \nu_i p_i^t \pi_i(k, 0) + \mathbf{1}(k=1)\lambda_i p_i^t \pi_i(0, 0^*), \\ (\lambda_i + \mu_i^f)\pi_i(k, 3) &= \lambda_i\pi_i(k-1, 3) + \gamma_i\pi_i(k, 0) + \mathbf{1}(k=1)\lambda_i\pi_i(0, 3^*). \end{aligned} \quad (4.1)$$

$k = 0$ の場合,

$$\begin{aligned} (\lambda_i + \gamma_i + \nu_i)\pi_i(0, 0) &= \mu_i^s\pi_i(1, 1) + \mu_i^f\pi_i(0, 3), \\ (\lambda_i + \gamma_i)\pi_i(0, 0^*) &= \nu_i\pi_i(0, 0) + \mu_i^f\pi_i(0, 3^*), \\ \pi_i(0, 1) &= \pi_i(0, 2) = 0, \\ (\lambda_i + \mu_i^f)\pi_i(0, 3) &= \gamma_i\pi_i(0, 0), \\ (\lambda_i + \mu_i^f)\pi_i(0, 3^*) &= \gamma_i\pi_i(0, 0^*). \end{aligned} \quad (4.2)$$

$k = K_i$ の場合,

$$\begin{aligned} (\gamma_i + \nu_i)\pi_i(K, 0) &= \lambda_i\pi_i(K-1, 0) + \mu_i^c\pi_i(K, 2) + \mu_i^f\pi_i(K, 3), \\ \mu_i^s\pi_i(K, 1) &= \lambda_i\pi_i(K-1, 1) + \nu_i(1 - p_i^t)\pi_i(K, 0), \\ \mu_i^c\pi_i(K, 2) &= \lambda_i\pi_i(K-1, 2) + \nu_i p_i^t \pi_i(K, 0), \\ \mu_i^f\pi_i(K, 3) &= \lambda_i\pi_i(K-1, 3) + \gamma_i\pi_i(K, 0). \end{aligned} \quad (4.3)$$

4.4 未知パラメータの導出方法

この節で、平衡方程式に含まれる未知パラメータ p_i^t, γ_i の求め方を説明する。それ以外のパラメータ (ν_i, μ_i^s, μ_i^c) は、3.5 節を参照のこと。

4.4.1 フレーム送信失敗率

ビットエラーの影響を考慮しない場合は、フレーム送信失敗は送信衝突により引き起こされる。端末 j のチャネルアイドル状態でのフレーム送信レート r_j (単位時間あたりの平均フレーム送信回数) は以下の式で与えられる。

$$r_j = \frac{\lambda_j \pi_j(0, 0^*) + \sum_{k=1}^{K_i} \nu_j \pi_j(k, 0)}{\pi_j(0, 0^*) + \sum_{k=0}^{K_i} \pi_j(k, 0)}.$$

端末 i と送信衝突する可能性があるのは端末 $i+1$ と $i-1$ のみである。ただし、端末 i がチャネルアイドル状態にあっても、隣の端末がチャネルアイドル状態にあるとは限らない点に留意する必要がある。例えば、端末 $i+2$ がフレーム送信中であるならば、端末 i から見るとチャネルアイドルであっても、端末 $i+1$ はキャリアセンス状態にあることになる。このことを考慮すると

$$p_i^t = 1 - e^{-(r_{i-1}P(T_{i-1}=0|T_i=0) + r_{i+1}P(T_{i+1}=0|T_i=0))T_s}. \quad (4.4)$$

ここで、 $T_i = s$ は端末 i が状態 s にある事象を表しており、 $P(T_{i-1} = 0|T_i = 0)$ は端末 i がチャネルアイドル状態のときに、端末 $i-1$ がチャネルアイドル状態である条件付確率の意味になる。端末 i がチャネルアイドル状態のときは、端末 $i-1$ はアイドルもしくはキャリアセンス状態にあり、後者は端末 $i-2$ が送信状態にある場合に限られる。このことから

$$P(T_{i-1} = 0|T_i = 0) \approx \frac{\pi_{i-1}^{(0)}}{\pi_{i-1}^{(0)} + \pi_{i-1}^{(3)} \cdot (\pi_{i-2}^{(1)} + \pi_{i-2}^{(2)})},$$

$$P(T_{i+1} = 0|T_i = 0) \approx \frac{\pi_{i+1}^{(0)}}{\pi_{i+1}^{(0)} + \pi_{i+1}^{(3)} \cdot (\pi_{i+2}^{(1)} + \pi_{i+2}^{(2)})}.$$

ここで、

$$\pi_i^{(0)} \stackrel{\text{def}}{=} \pi_i(0, 0^*) + \sum_{k=0}^{K_i} \pi_i(k, 0), \quad \pi_i^{(1)} \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{k=0}^{K_i} \pi_i(k, 1),$$

$$\pi_i^{(2)} \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{k=0}^{K_i} \pi_i(k, 2), \quad \pi_i^{(3)} \stackrel{\text{def}}{=} \pi_i(0, 3^*) + \sum_{k=0}^{K_i} \pi_i(k, 3).$$

4.4.2 キャリアセンス状態への遷移率

キャリアセンス状態への遷移率 γ_i は、端末 i のキャリアセンス範囲にある端末の送信状態の確率から決定できる。平衡方程式から、以下の式が得られる。

$$\mu_i^f \pi_i^{(3)} = \gamma_i \pi_i^{(0)}, \quad (4.5)$$

端末 i がキャリアセンス状態にあるならば、端末 i のキャリアセンス範囲内の少なくとも 1 台の端末が送信状態になければならない。このことから、

$$\pi_i^{(3)} = \frac{\pi_{i-1}^{(1)} + P(\{T_{i-1} = 2\} \cap \{T_i = 3\}) + \pi_{i+1}^{(1)} + P(\{T_{i+1} = 2\} \cap \{T_i = 3\})}{1 - \pi_i^{(1)} - \pi_i^{(2)}} \left(\pi_{i-1}^{(1)} + P(\{T_{i-1} = 2\} \cap \{T_i = 3\}) \right) \left(\pi_{i+1}^{(1)} + P(\{T_{i+1} = 2\} \cap \{T_i = 3\}) \right). \quad (4.6)$$

ここで、右辺の最後の項はユーザ $i-1$ の端末が送信状態にある期間とユーザ $i+1$ の端末が送信状態にある期間が重なることを考慮した補正項である。 $P(\{T_{i-1} = 2\} \cap \{T_i = 3\})$ は端末 i がキャリアセンス状態にあり、かつ端末 $i-1$ が送信失敗状態にある確率である。端末 $i-1$ が送信失敗状態のときは、端末 i は送信失敗もしくはキャリアセンス状態にあることから、

$$P(\{T_{i-1} = 2\} \cap \{T_i = 3\}) = P(T_i = 3 | T_{i-1} = 2) P(T_{i-1} = 2) \approx \frac{\pi_{i-1}^{(2)} \pi_i^{(3)}}{\pi_i^{(2)} + \pi_i^{(3)}}.$$

同様に、

$$P(\{T_{i+1} = 2\} \cap \{T_i = 3\}) = P(T_i = 3 | T_{i+1} = 2) P(T_{i+1} = 2) \approx \frac{\pi_{i+1}^{(2)} \pi_i^{(3)}}{\pi_i^{(2)} + \pi_i^{(3)}}.$$

各端末が競合しあう隣接端末の集合は異なるため、端末ごとに式 (4.6) の補正が必要である。例えば、端末が 3 台 (端末 1, 2, 3) の場合、

$$\pi_1^{(3)} = \pi_2^{(1)} + \pi_3^{(2)}, \quad \pi_2^{(3)} = \pi_1^{(1)} + \pi_2^{(1)} - \frac{\pi_1^{(1)} \pi_3^{(1)}}{1 - \pi_2^{(1)} - \pi_2^{(2)}}, \quad \pi_3^{(3)} = \pi_2^{(1)} + \pi_1^{(2)}.$$

また、端末が 4 台 (端末 1, 2, 3, 4) の場合、

$$\pi_1^{(3)} = \pi_2^{(1)} + \frac{\pi_2^{(2)} \pi_1^{(3)}}{\pi_1^{(2)} + \pi_1^{(3)}}, \quad \pi_2^{(3)} = \pi_1^{(1)} + \pi_3^{(1)} + \frac{\pi_3^{(2)} \pi_2^{(3)}}{\pi_2^{(2)} + \pi_2^{(3)}} - \frac{\pi_1^{(1)} \left(\pi_3^{(1)} + \frac{\pi_3^{(2)} \pi_2^{(3)}}{\pi_2^{(2)} + \pi_2^{(3)}} \right)}{1 - \pi_2^{(1)} - \pi_2^{(2)}},$$

$$\pi_3^{(3)} = \pi_2^{(1)} + \pi_4^{(1)} + \frac{\pi_2^{(2)} \pi_3^{(3)}}{\pi_3^{(2)} + \pi_3^{(3)}} - \frac{\pi_4^{(1)} \left(\pi_2^{(1)} + \frac{\pi_2^{(2)} \pi_3^{(3)}}{\pi_3^{(2)} + \pi_3^{(3)}} \right)}{1 - \pi_3^{(1)} - \pi_3^{(2)}}, \quad \pi_4^{(3)} = \pi_3^{(1)} + \frac{\pi_3^{(2)} \pi_4^{(3)}}{\pi_4^{(2)} + \pi_4^{(3)}}.$$

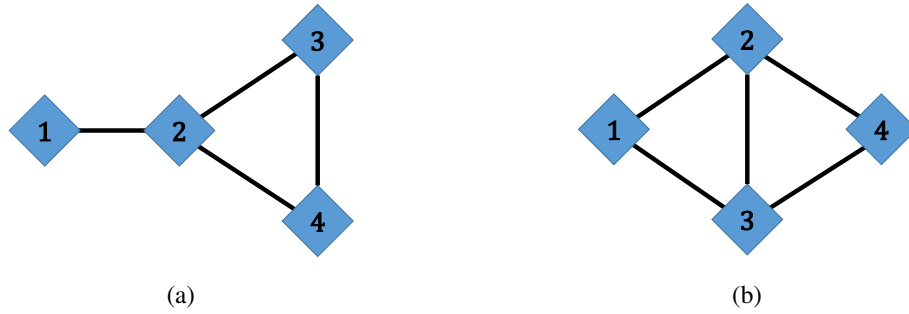


図 4.5: 一般的なネットワークポロジ

以上を式 (4.5) に代入すれば, γ_i が求められる.

4.4.3 他のネットワークポロジへの拡張

一般的に, 無線端末は必ずしも図 4.1 のように一列に並んでいるとは限らない. しかし, 同じ競合関係を持つ端末同士をクラスタリングすることで, 複雑なネットワークポロジを近似で「一列」に集約できれば, 前述した解析手法は依然として適用できる. この節で, 図 4.5 に示した 2 つのネットワークポロジを例として, パラメータ (p_i^t, γ_i) の計算例を示す.

まず, 図 4.5a に示したシナリオを考える. この場合では, 端末 2, 3, 4 が相互に隣接するため, ネットワークを $\{1\}$, $\{2\}$, $\{3, 4\}$ のようにグループ分けすることができる. グループ $\{3, 4\}$ 内に高々 1 台の端末が送信成功状態になることに注意すると, 各端末のフレーム送信失敗率とキャリアセンス状態にある確率は以下で計算する.

$$p_1^t = 1 - e^{-r_2 P(T_2=0|T_1=0)T_s}, \quad P(T_2 = 0|T_1 = 0) \approx \frac{\pi_2^{(0)}}{\pi_2^{(0)} + \pi_2^{(3)} \cdot (\pi_3^{(1)} + \pi_4^{(1)} + \pi_3^{(2)})},$$

$$p_2^t = 1 - e^{-\sum_{j \neq 2} r_j T_s},$$

$$p_3^t = 1 - e^{-(r_4 + r_2 P(T_2=0|T_3=0))T_s}, \quad P(T_2 = 0|T_3 = 0) \approx \frac{\pi_2^{(0)}}{\pi_2^{(0)} + \pi_2^{(3)} \cdot \pi_1^{(1)}},$$

$$p_4^t = 1 - e^{-(r_3 + r_2 P(T_2=0|T_4=0))T_s}, \quad P(T_2 = 0|T_4 = 0) \approx \frac{\pi_2^{(0)}}{\pi_2^{(0)} + \pi_2^{(3)} \cdot \pi_1^{(1)}}.$$

$$\begin{aligned}
\pi_1^{(3)} &= \pi_2^{(1)} + P(\{T_2 = 2\} \cap \{T_1 = 3\}) \approx \pi_2^{(1)} + \frac{\pi_2^{(2)} \pi_1^{(3)}}{\pi_1^{(2)} + \pi_1^{(3)}}, \\
\pi_2^{(3)} &= \pi_1^{(1)} + \pi_3^{(1)} + \pi_4^{(1)} + P(\{T_3 = 2\} \cap \{T_2 = 3\}) \\
&\quad - \frac{\pi_1^{(1)} \left(\pi_3^{(1)} + \pi_4^{(1)} + P(\{T_3 = 2\} \cap \{T_2 = 3\}) \right)}{1 - \pi_2^{(1)} - \pi_2^{(2)}} \\
&\approx \pi_1^{(1)} + \pi_3^{(1)} + \pi_4^{(1)} + \frac{\pi_3^{(2)} \pi_2^{(3)}}{\pi_2^{(2)} + \pi_2^{(3)}} - \frac{\pi_1^{(1)} \left(\pi_3^{(1)} + \pi_4^{(1)} + \frac{\pi_3^{(2)} \pi_2^{(3)}}{\pi_2^{(2)} + \pi_2^{(3)}} \right)}{1 - \pi_2^{(1)} - \pi_2^{(2)}}, \\
\pi_3^{(3)} &= \pi_2^{(1)} + \pi_4^{(1)} + P(\{T_2 = 2\} \cap \{T_3 = 3\}) \approx \pi_2^{(1)} + \pi_4^{(1)} + \frac{\pi_2^{(2)} \pi_3^{(3)}}{\pi_3^{(2)} + \pi_3^{(3)}}, \\
\pi_4^{(3)} &= \pi_2^{(1)} + \pi_3^{(1)} + P(\{T_2 = 2\} \cap \{T_4 = 3\}) \approx \pi_2^{(1)} + \pi_3^{(1)} + \frac{\pi_2^{(2)} \pi_4^{(3)}}{\pi_4^{(2)} + \pi_4^{(3)}}.
\end{aligned}$$

同様に、図 4.5b に示したシナリオは、端末 2 と端末 3 が同時に端末 1 と端末 4 に隣接するため、ネットワークを {1}, {2, 3}, {4} のようにグループ分けすることができる。端末 1 と端末 4 が送信状態にある期間が重なる可能な時間は、端末 2 と端末 3 両方とも送信しない間に限られている点に注意すると、各端末のフレーム送信失敗率とキャリアセンス状態にある確率は以下で与える。

$$\begin{aligned}
p_1^t &= 1 - e^{-(r_2 P(T_2=0|T_1=0) + r_3 P(T_3=0|T_1=0)) T_s}, & p_2^t &= 1 - e^{-\sum_{j \neq 2} r_j T_s}, \\
p_3^t &= 1 - e^{-\sum_{j \neq 3} r_j T_s}, & p_4^t &= 1 - e^{-(r_2 P(T_2=0|T_4=0) + r_3 P(T_3=0|T_4=0)) T_s}, \\
P(T_2 = 0|T_1 = 0) &\approx \frac{\pi_2^{(0)}}{\pi_2^{(0)} + \pi_2^{(3)} \cdot \pi_4^{(1)}}, & P(T_3 = 0|T_1 = 0) &\approx \frac{\pi_3^{(0)}}{\pi_3^{(0)} + \pi_3^{(3)} \cdot \pi_4^{(1)}}, \\
P(T_2 = 0|T_4 = 0) &\approx \frac{\pi_2^{(0)}}{\pi_2^{(0)} + \pi_2^{(3)} \cdot \pi_1^{(1)}}, & P(T_3 = 0|T_4 = 0) &\approx \frac{\pi_3^{(0)}}{\pi_3^{(0)} + \pi_3^{(3)} \cdot \pi_1^{(1)}}.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\pi_1^{(3)} &= \pi_2^{(1)} + \pi_3^{(1)} + P(\{T_2 = 2\} \cap \{T_1 = 3\}) + P(\{T_4 = 2\} \cap \{T_2 = 3\}) \\
&\approx \pi_2^{(1)} + \pi_3^{(1)} + \frac{\pi_2^{(2)} \pi_1^{(3)}}{\pi_1^{(2)} + \pi_1^{(3)}} + \frac{\pi_4^{(2)} \pi_2^{(3)}}{\pi_2^{(2)} + \pi_2^{(3)}}, \\
\pi_2^{(3)} &= \pi_1^{(1)} + P(\{T_1 = 2\} \cap \{T_2 = 3\}) + \pi_3^{(1)} + \pi_4^{(1)} + P(\{T_4 = 2\} \cap \{T_2 = 3\}) \\
&\quad - \frac{\pi_1^{(1)} \cdot \pi_4^{(1)}}{(1 - \pi_2^{(1)} - \pi_2^{(2)})(1 - \pi_3^{(1)} - \pi_3^{(2)})} \\
&\approx \pi_1^{(1)} + \pi_3^{(1)} + \pi_4^{(1)} + \frac{\pi_1^{(2)} \pi_2^{(3)}}{\pi_2^{(2)} + \pi_2^{(3)}} + \frac{\pi_4^{(2)} \pi_2^{(3)}}{\pi_2^{(2)} + \pi_2^{(3)}} - \frac{\pi_1^{(1)} \cdot \pi_4^{(1)}}{(1 - \pi_2^{(1)} - \pi_2^{(2)})(1 - \pi_3^{(1)} - \pi_3^{(2)})}, \\
\pi_3^{(3)} &= \pi_1^{(1)} + P(\{T_1 = 2\} \cap \{T_3 = 3\}) + \pi_2^{(1)} + \pi_4^{(1)} + P(\{T_4 = 2\} \cap \{T_3 = 3\}) \\
&\quad - \frac{\pi_1^{(1)} \cdot \pi_4^{(1)}}{(1 - \pi_2^{(1)} - \pi_2^{(2)})(1 - \pi_3^{(1)} - \pi_3^{(2)})} \\
&\approx \pi_1^{(1)} + \pi_2^{(1)} + \pi_4^{(1)} + \frac{\pi_1^{(2)} \pi_3^{(3)}}{\pi_3^{(2)} + \pi_3^{(3)}} + \frac{\pi_4^{(2)} \pi_3^{(3)}}{\pi_3^{(2)} + \pi_3^{(3)}} - \frac{\pi_1^{(1)} \cdot \pi_4^{(1)}}{(1 - \pi_2^{(1)} - \pi_2^{(2)})(1 - \pi_3^{(1)} - \pi_3^{(2)})}, \\
\pi_4^{(3)} &= \pi_2^{(1)} + \pi_3^{(1)} + P(\{T_2 = 2\} \cap \{T_4 = 3\}) + P(\{T_1 = 2\} \cap \{T_2 = 3\}) \\
&\approx \pi_2^{(1)} + \pi_3^{(1)} + \frac{\pi_2^{(2)} \pi_4^{(3)}}{\pi_4^{(2)} + \pi_4^{(3)}} + \frac{\pi_1^{(2)} \pi_2^{(3)}}{\pi_2^{(2)} + \pi_2^{(3)}}.
\end{aligned}$$

以上のキャリアセンス状態にある確率を式 (4.5) に代入すれば、 γ_i が求められる。

4.5 数値評価

複数のテザリングユーザが近距離に配置され、各ユーザは下り方向（スマートフォン→タブレット端末）の通信のみを行うシナリオを想定する。スマートフォン→タブレット端末間の通信は、表 3.1 に示した 802.11a 規格の無線 LAN によって行われるとする。各ユーザの送信負荷（通信量）はすべて等しい条件で、通信量を増やししながら、各テザリングユーザのスループットと（スマートフォンの内部に形成されるフレームの）平均待ち行列長を評価する。

図 4.6～図 4.11 は、図 4.1 に示したテザリングユーザが一列に並んでいるシナリオに、テザリングユーザ数が 3 人、4 人、5 人の場合の結果、図 4.12～図 4.15 は、図 4.5 に示したシナリオの結果をそれぞれ示したものである。

ユーザ数が 3 人の場合、端末 2 のキャリアセンス範囲に端末 1 と 3 が存在する。送信負荷が高くなると、端末 2 が端末 1 と端末 3 の送信を連続してキャリアセンスする（端末 1 の送信状態と端末 3 の送信状態が連続して続き、その間、端末 2 は継続してキャリ

アセスメント状態にある) ことになり, 送信頻度が大幅に減少し, 飽和状態スループットは 3.26Mbps (シミュレーション実験値, 以下同じ) しかない. 同様に, ユーザ数が 4 人のシナリオでは, 真ん中にある端末 2, 3 と両端の端末 1, 4 のスループットが大きく異なる不公平問題が生じる. 一方, ユーザ数が 5 人のシナリオにおいて, 真ん中にある端末 3 は相対的に高いスループットが得られた. このシナリオで, 端末 1 と 5 の干渉を受け, 端末 2 と 4 の送信頻度が減少した結果, 端末 3 がほとんど端末 2 と 4 に影響されず, チャンネルを独占して送信できている.

図 4.5 に示したシナリオでは, テザリングユーザ数が 3 人で一列に並んでいる場合と同じように, 中央に位置する端末と両端の端末はスループット性能が大きく異なる現象が見える. 図 4.5a に示したシナリオでは, 真ん中の端末 2 は他の 3 台の端末の送信を連続してキャリアセンスしたため, 飽和状態のスループットはさらに減少した (2.15Mbps). 端末 3 と端末 4 の飽和スループットの総和は, 大体端末 1 に相当する. 一方, 図 4.5b に示したシナリオでは, 真ん中に 2 台の端末が存在したため, 両端の端末が思い切りに送信する状況が少々改善され, 端末 2 と端末 3 の飽和スループットは合計で 5.38Mbps になった. いずれのケースにおいても, 提案モデルによる解析結果はシミュレーション結果に一致している.

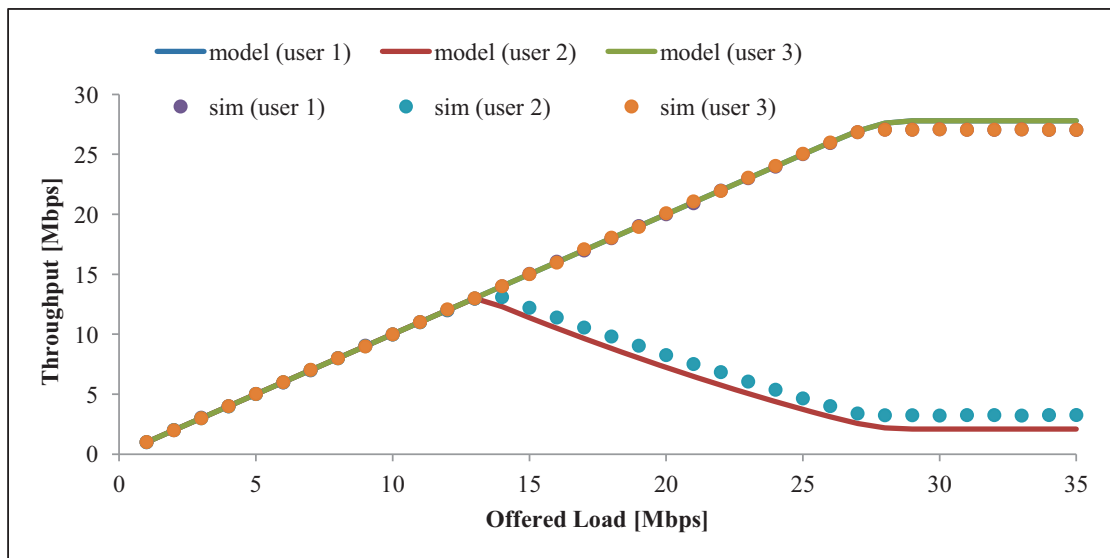


図 4.6: スループット (一列に 3 ユーザ)

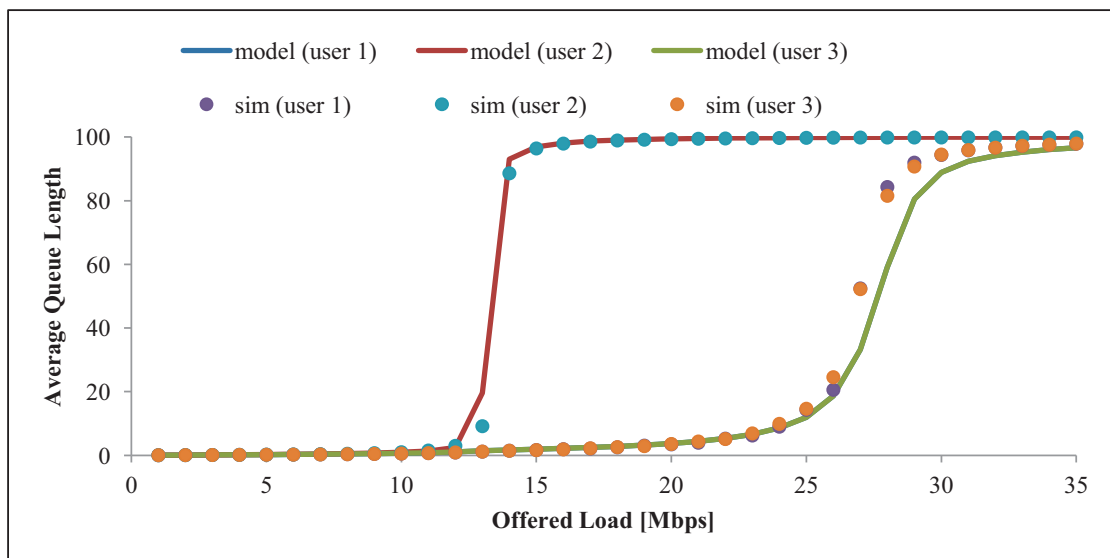


図 4.7: 平均待ち行列長 (一列に 3 ユーザ)

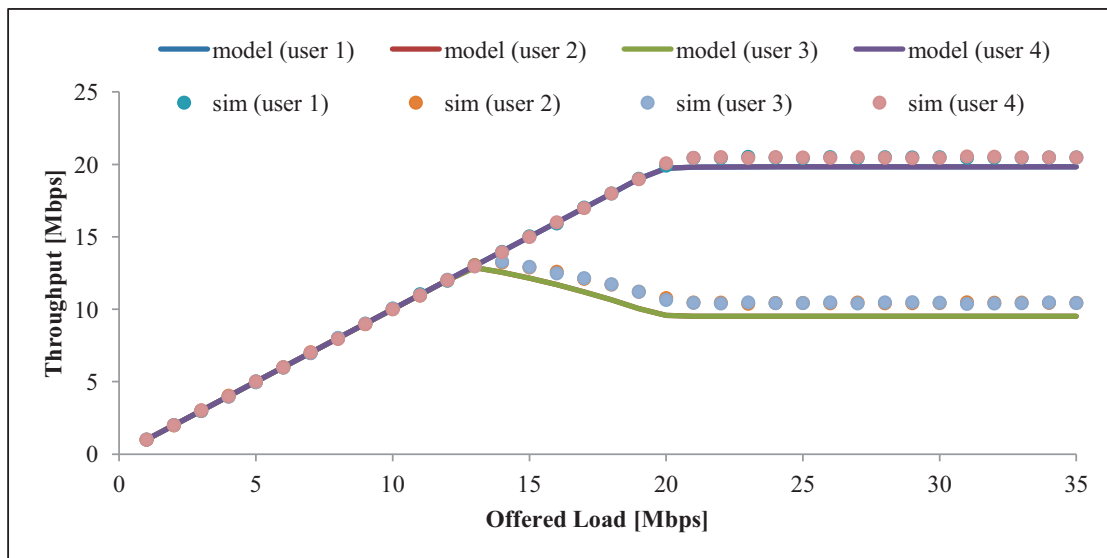


図 4.8: スループット (一列に 4 ユーザ)

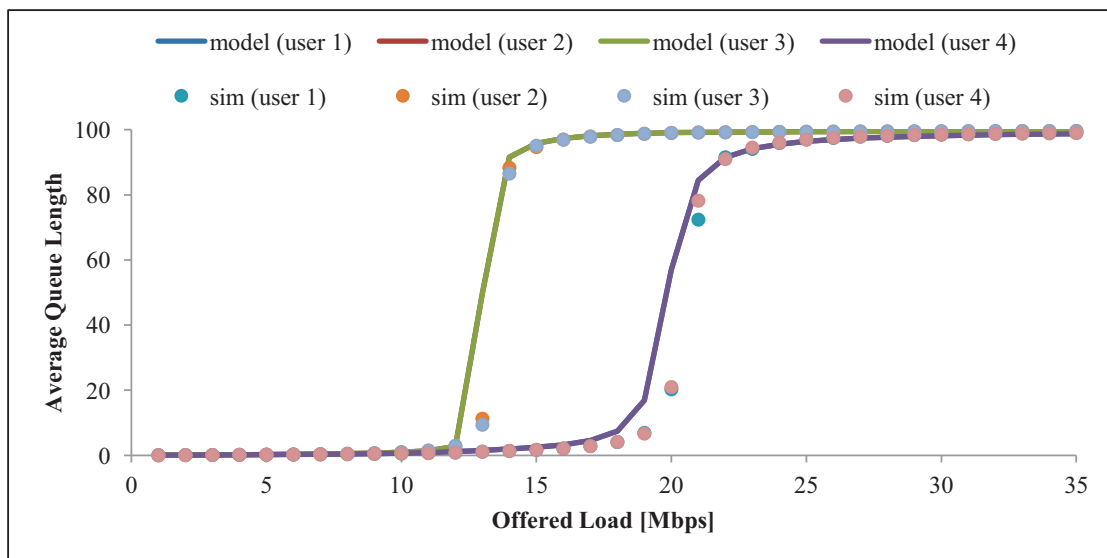


図 4.9: 平均待ち行列長 (一列に 4 ユーザ)

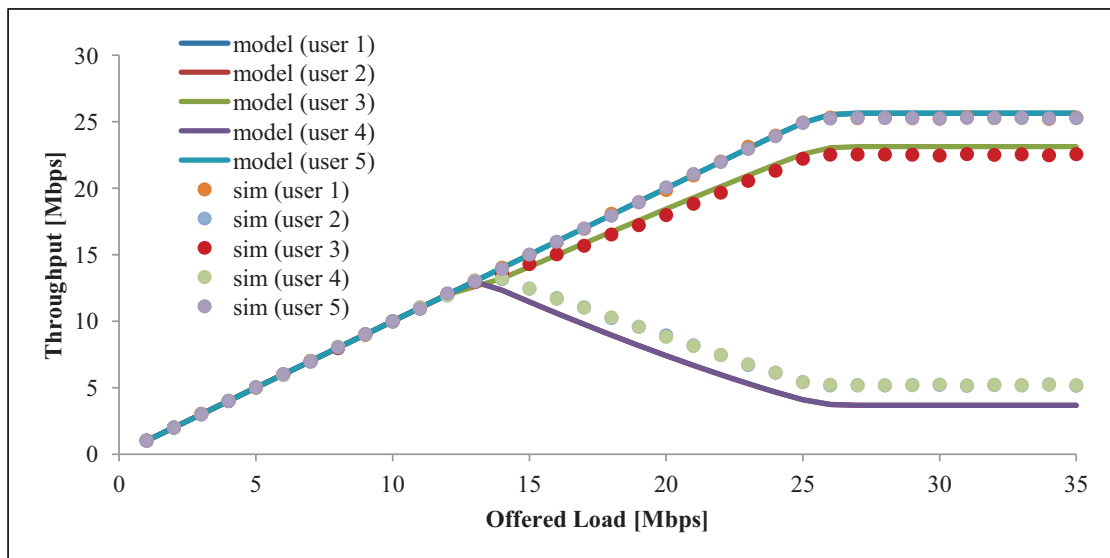


図 4.10: スループット (一列に 5 ユーザ)

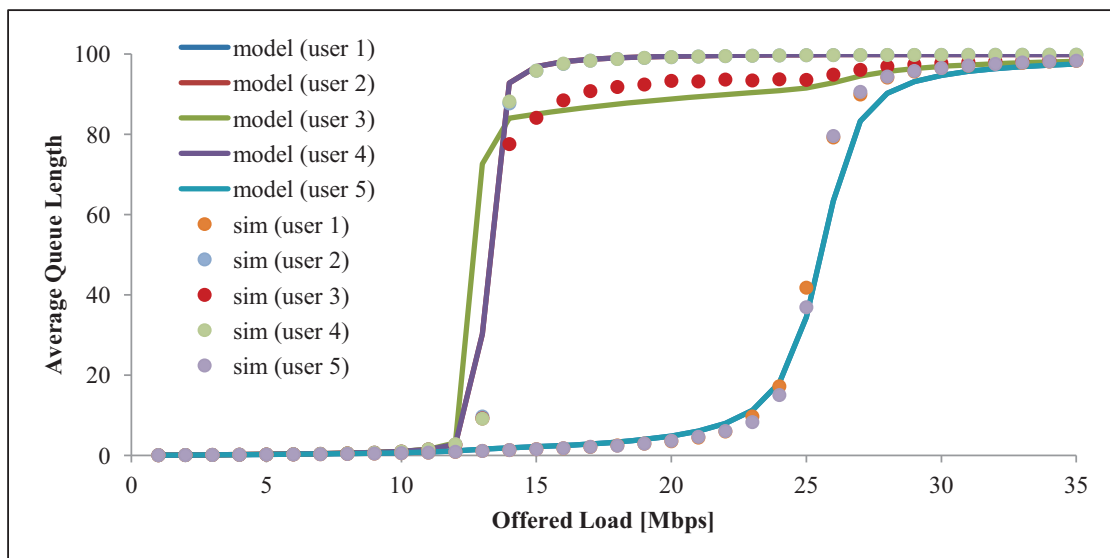


図 4.11: 平均待ち行列長 (一列に 5 ユーザ)

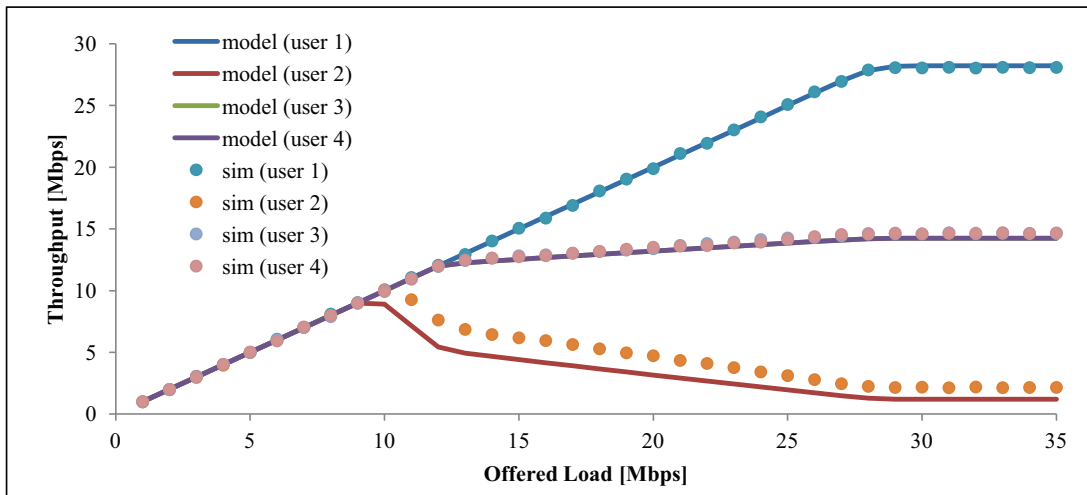


図 4.12: スループット (図 4.5a シナリオ)

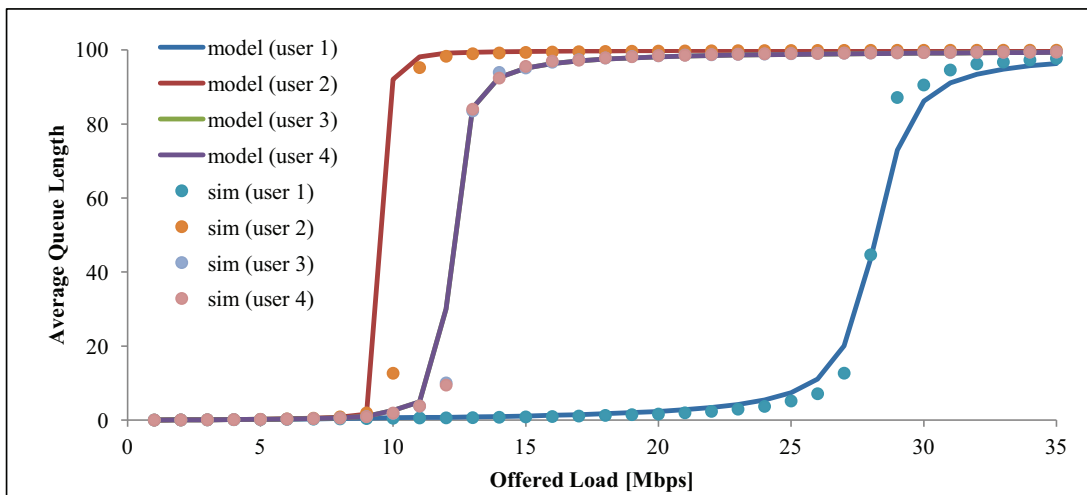


図 4.13: 平均待ち行列長 (図 4.5a シナリオ)

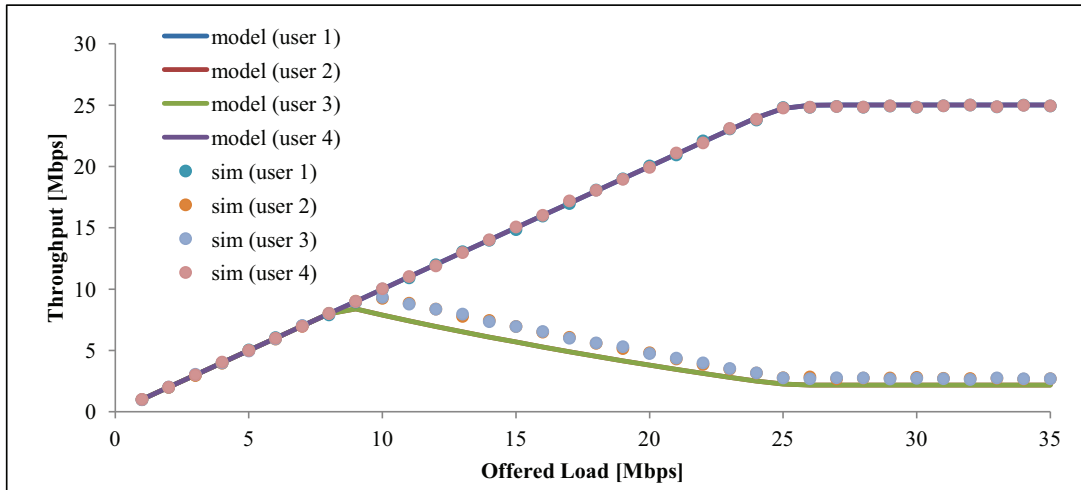


図 4.14: スループット (図 4.5b シナリオ)

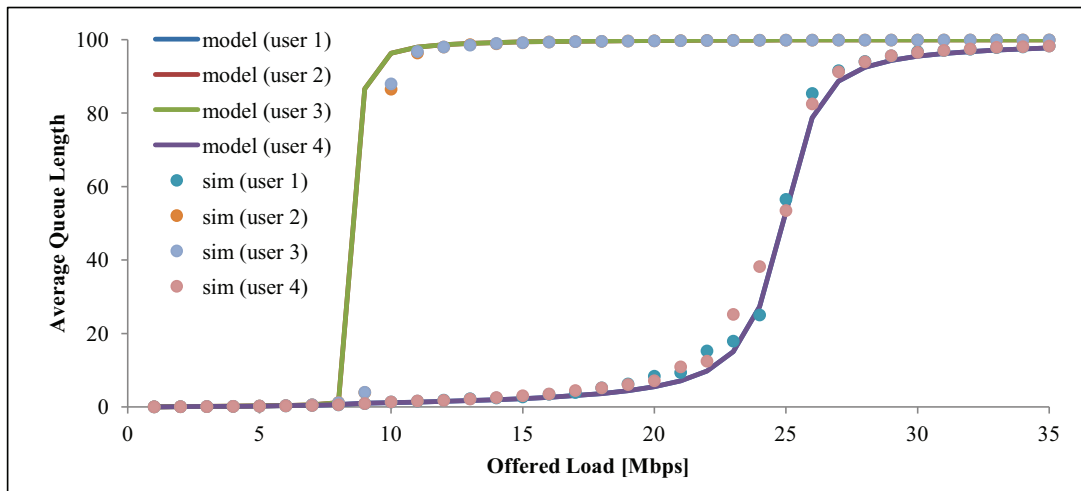


図 4.15: 平均待ち行列長 (図 4.5b シナリオ)

図 4.6～図 4.11, および図 4.12～図 4.15 に示した数値例において, 飽和状態のスループット (各図の右端のスループット) のシミュレーション結果と解析結果との間には若干の差異がある. ここで考えたシナリオ (複数のテザリングユーザが近距離に位置するシナリオ) において, 飽和状態におけるスループットを評価できる既存検討の代表例に BoE 法 [34] がある. そこで, 飽和状態のスループットについて, 本章で提案する手法と BoE 法との精度比較を行った. 以下が, BoE 法の計算手順である.

- 通信リンク間の競合グラフを抽出する.
- 競合グラフからすべてのリンクの最大独立集合 (MISs) を求める.
- リンク i の正規化されたスループット n_i/n を求める. (n_i : リンク i を含めた MIS の数, n : ステップ 2 で求めた MIS の総和)
- 正規化スループットを実際のスループットに変換する. ($Th_{actual} = Th_{norm} \cdot Th_{singlelink}$)

実際のスループットに変換する際に, UDP フローが 1 本のみ存在する場合の飽和スループット $Th_{singlelink}$ は 29.86Mbps で計算する.

比較結果を図 4.16～図 4.20 に示す. いずれのケースでも, 提案手法により求めたスループット値は BoE 法により求めたスループット値よりも, シミュレーション結果と良く一致している. BoE 法によるスループット評価は, 送信頻度が極めて少ない端末の送信をあえて考慮せず, 端末間のフレーム衝突やフレーム再送によるバックオフ期間の指数増大などの影響を無視しており. これらが BoE 法の無視しえない誤差要因となっていると考えられる.

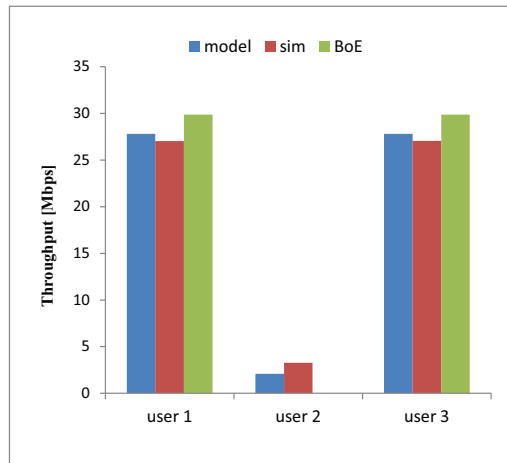


図 4.16: 飽和状態スループット (一列に 3 ユーザ)

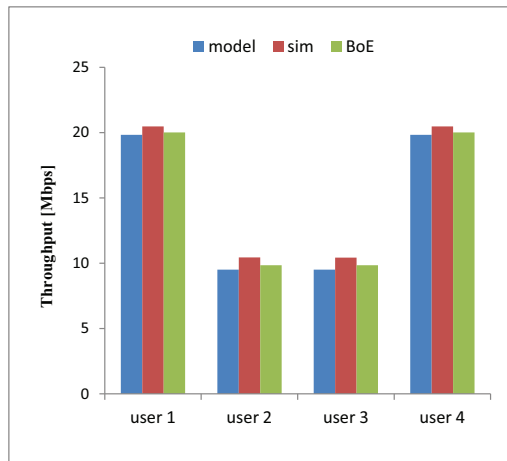


図 4.17: 飽和状態スループット (一列に 4 ユーザ)

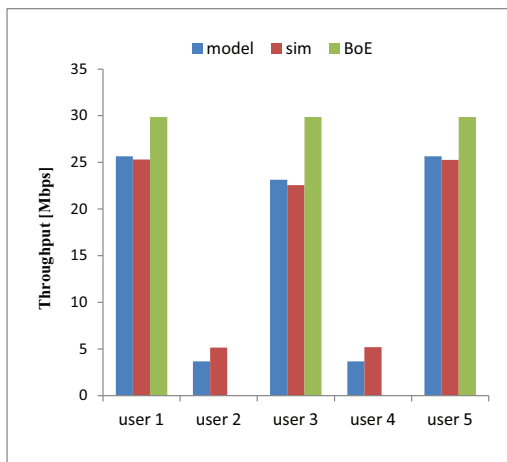


図 4.18: 飽和状態スループット (一列に 5 ユーザ)

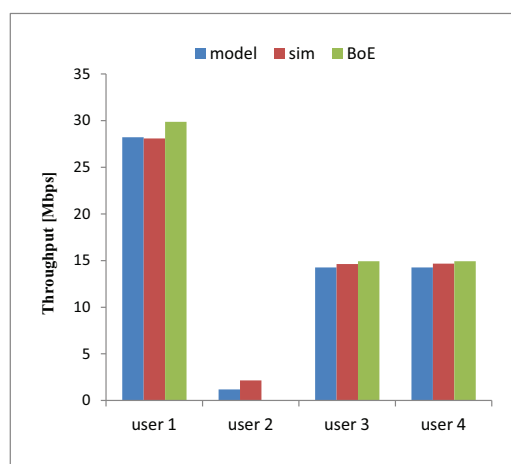


図 4.19: 飽和状態スループット (図 4.5a シナリオ)

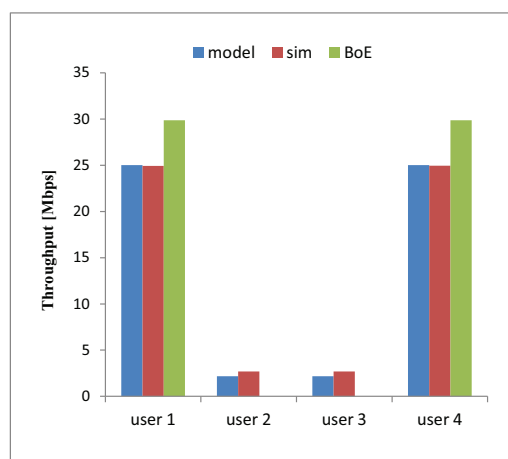


図 4.20: 飽和状態スループット (図 4.5b シナリオ)

4.6 まとめ

本章では複数のテザリングユーザが互いに近くにいるシナリオでのスループット性能の解析評価法について検討した。本章のシナリオでは、各端末のキャリアセンス範囲に全端末が含まれるわけがないため、隠れ端末やさらし端末が存在する可能性がある。隠れ端末やさらし端末が存在する配置での解析は一般に非常に複雑であり、BoEモデルのように既存検討の多くは飽和状態のスループットの近似計算を試みるレベルにとどまっている。本研究では、隠れ端末やさらし端末が存在する場合でも非飽和状態のスループットを計算可能なように3章のモデルを拡張し、テザリングユーザが密集環境を例にとってスループット性能の評価法を示した。シミュレーション結果より、提案手法は非飽和条件での評価が可能だけでなく、飽和条件においてもBoEモデルより高い精度でスループット性能が評価できることが明らかとなった。

第 5 章

フレーム送信時間の端末依存性を考慮した性能評価手法

3 章で述べた評価モデルでは、フレームサイズやフレーム送信時間は全ての端末に共通で、ビットエラー発生要因によるフレームの損失も考慮されていなかった。実際の無線通信環境では、雑音に比して信号を運ぶ電波の強度が低かったり、マルチパスフェージングが多発したりするなど、電波環境が劣悪な場合には、ビットエラーによるフレーム損失が生じる。ビットエラーレート（Bit Error Rate: BER）が一定の場合、フレームサイズが長いほど、パケットが正しく受信される確率が低下する。また、無線 LAN では、ビットエラーレートを適切な値に維持するために複数の伝送レートが規定されており、ビットエラーの発生状況に応じて、自動的に適切な伝送レートが選択される仕組みが取り入れられている。一般に、電波環境が劣悪で高速の伝送レートを維持できない場合には、低速な伝送レートの切り替えが行われ、電波環境が良好な場合はより高速な伝送レートに切り替えられる。端末により、伝送レートが異なる場合、たとえフレームのサイズが等しくとも、フレームの送信に要する時間は端末毎に異なることになる。

様々な送信時間を要するフレームが混在する場合、フレーム衝突時のフレーム送信時間は、衝突に遭遇したフレームの中で送信に最も時間のかかるフレームの送信時間に等しくなる。衝突を起こす端末の組み合わせを全て考慮して衝突時のフレーム送信時間を決定するのは容易でなく、端末数が増えると衝突を起こす端末の組み合わせ数が爆発する。送信時間が様々なフレームが混在する場合を取り扱った Wi-Fi の性能解析法は幾つか存在する [30, 31] が、組み合わせ数の爆発への対処まで想定した手法は存在しない（多くは近似での解析にとどまっている）。本章では、フレーム長やフレーム送信速度に基づいて端末を幾つかの「(端末) タイプ」に分類しまとめて扱うことで、衝突時のフレーム送信時間を、厳密かつ効率的に算出することを可能とする解析モデルの拡張について述べる。

5.1 対象モデル

無線端末と1台のアクセスポイント（以下，AP）から構成されるシングルホップ無線LANを考える．隠れ端末やさらし端末は存在しないとする．端末は送信するフレームサイズや伝送レートの異なる I 種類のタイプに分類される．タイプ i ($1 \leq i \leq I$) の端末の台数，フレーム送信時間およびフレーム長を N_i ， $T_D(i)$ および D_i で表す．タイプ i の端末は最大 K_i 個のフレームを格納できる送信バッファを持ち，到着率 λ_i のポアソン過程に従ってフレームが発生する（アプリケーションがフレームを生成，もしくは有線経由でフレームを受信する）とする．

フレームの送信失敗は，複数の端末がフレームを同時送信することによるフレーム衝突，もしくはフレーム内のビットエラーにより生じるとする．端末が送信する際にビットエラーを生じる確率を p_e とすると， D ビットのフレームがビットエラーにより損失となる確率は $1 - (1 - p_e)^D$ に等しいとする．以下，一般性を損なうことなく， $T_D(1) \geq T_D(2) \geq \dots \geq T_D(I)$ を仮定する．

5.2 状態遷移

解析には3章で説明した端末のマクロ状態表現を用いた性能評価手法を基本的に利用する．端末の状態遷移は図3.2と図3.3に示した通りである． μ_i^s はタイプ i に属する端末の状態1の継続時間の期待値の逆数を表す． μ_i^s は以下で与えられる．

$$\mu_i^s = \frac{1}{T_D(i) + SIFS + T_{ACK} + DIFS}, \quad T_D(i) = D_i / R_{data}(i).$$

μ_i^c ， $\tilde{\mu}_i^s$ ， $\tilde{\mu}_i^c$ は，それぞれタイプ i に属する端末の状態2，状態3，状態4の継続時間の期待値の逆数を表す．これらは，着目する端末以外の端末のフレーム送信時間に依存し，フレーム送信時間が端末により異なる場合は，その算出が非常に複雑になる．これについては5.3節で説明する．

5.3 端末依存性を考慮したフレーム送信時間算出法

図5.1に示すように，送信失敗時のフレーム送信時間は，送信されたフレームのうち，送信に最も時間がかかるフレームの送信時間で決定される．以下，この点を考慮して，状態2，3，4の継続時間 ($1/\mu_i^c$ ， $1/\tilde{\mu}_i^s$ ， $1/\tilde{\mu}_i^c$) とフレーム送信失敗確率 (p_i^t ， p_i^f) の求め方について説明する．

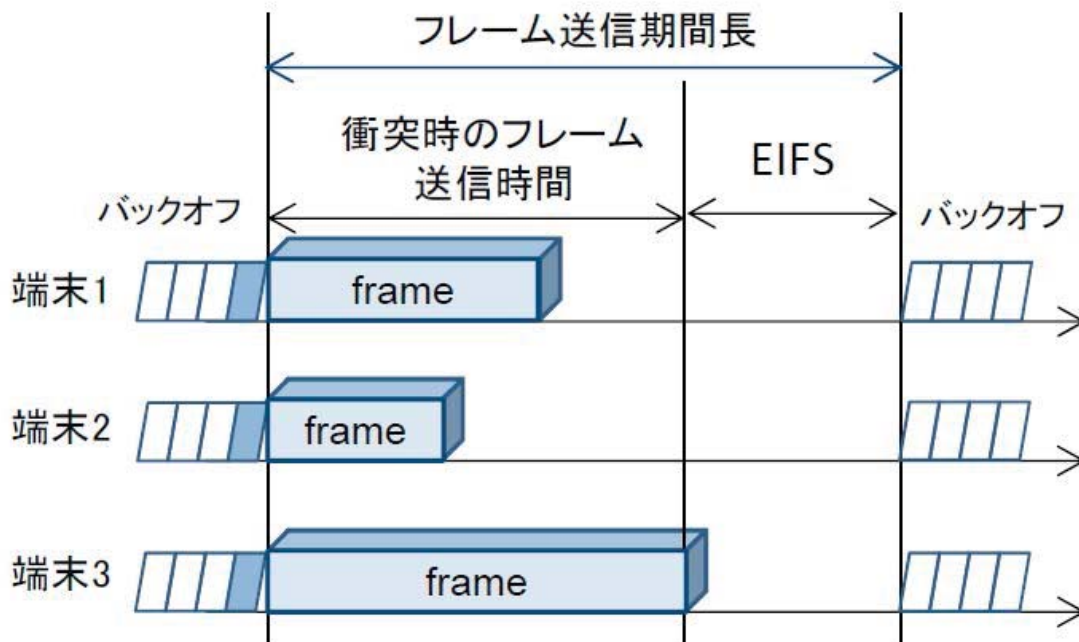


図 5.1: 衝突時のフレーム送信時間

5.3.1 送信失敗時のフレーム送信時間

タイプ i の端末がフレーム送信を試み、送信に失敗したときの状態 2 の平均継続時間 $1/\mu_i^c$ を求める。タイプ i の端末が送信に失敗する事象を F_i と記す。 F_i は、排反な以下の二つの事象に分けられる。

$F_{i,1}$: 当該端末のみがフレームを送信し、ビットエラーにより送信に失敗

$F_{i,2}$: 当該端末以外の端末がフレームを送信し、フレーム衝突が発生

以下が得られる。

$$P(F_{i,1}) = e^{-\sum_{j=1}^I \tilde{N}_j(i) r_j T_s} (1 - (1 - p_e)^{D_i}).$$

ここで、 r_i はタイプ i の端末が、チャンネルアイドル状態において送信を始める頻度（単位時間あたりの送信開始回数）である。 $\tilde{N}_j(i)$ は以下で定義される。

$$\tilde{N}_j(i) = \begin{cases} N_j - 1, & j = i \\ N_j. & j \neq i \end{cases}$$

タイプ i の 1 台の端末（以下、端末 A）がフレーム送信を試みたときに、タイプ 1 からタイプ $j-1$ の（端末 A 以外の）どの端末も送信を行わないが、タイプ j の（端末 A 以外の）少なくとも 1 台以上の端末が送信を行う事象を $F_{i,2}^{(j)}$ と記す。以下が得られる。

$$P(F_{i,2}^{(j)}) = e^{-\sum_{k=1}^{j-1} \tilde{N}_k(i) r_k T_s} (1 - e^{-\tilde{N}_j(i) r_j T_s}).$$

$F_{i,2}^{(1)}, \dots, F_{i,2}^{(I)}$ は互いに背反な事象であるから

$$P(F_{i,2}) = \sum_{j=1}^I P(F_{i,2}^{(j)}) = 1 - e^{-\sum_{j=1}^I \tilde{N}_j(i) r_j T_s}.$$

以上より、タイプ i の端末が送信に失敗する確率 $p_i^t = P(F_i)$ は

$$\begin{aligned} p_i^t &= P(F_{i,1}) + P(F_{i,2}) \\ &= 1 - e^{-\sum_{j=1}^I \tilde{N}_j(i) r_j T_s} (1 - p_e)^{D_i}. \end{aligned}$$

事象 $F_{i,2}^{(j)}$ におけるフレーム送信時間は $T_D(j)(i > j)$ もしくは $T_D(i)(i \leq j)$ に等しいことに注意すると、

$$\begin{aligned} 1/\mu_i^c &= \left\{ T_D(i)P(F_{i,1}) + \sum_{j=1}^{i-1} T_D(j)P(F_{i,2}^{(j)}) + T_D(i) \sum_{j=i}^I P(F_{i,2}^{(j)}) \right\} / P(F_i) \\ &\quad + EIFS. \end{aligned}$$

5.3.2 待機中の端末が観測するフレーム送信時間

タイプ i の端末の状態 3 の平均継続時間 $1/\tilde{\mu}_i^s$ を求める。タイプ i の 1 台の端末が待機中に、タイプ j の 1 台の端末のみが送信を行う事象を $S_i^{(j)}$ と記すと、

$$1/\tilde{\mu}_i^s = \frac{\sum_{j=1}^I T_D(j)P(S_i^{(j)})}{\sum_{j=1}^I P(S_i^{(j)})} + SIFS + T_{ACK} + DIFS.$$

ここで、 $P(S_i^{(j)})$ は以下で計算できる。

$$P(S_i^{(j)}) = \tilde{N}_j(i)(1 - e^{-r_j T_s})e^{-\sum_{k=1}^I \tilde{N}_k(i)r_k T_s + r_j T_s}(1 - p_e)^{D_i}.$$

次に、タイプ i の状態 4 の平均継続時間 $1/\tilde{\mu}_i^c$ を求める。タイプ i の 1 台の端末（端末 A）が待機中に、端末 A 以外の他の端末がフレームを送信し、送信に失敗する事象を \tilde{F}_i と記す。 \tilde{F}_i は、排反な以下の二つの事象に分けられる。

$\tilde{F}_{i,1}$: 端末 A 以外のただ一台の端末がフレームを送信し、ビットエラーにより送信に失敗

$\tilde{F}_{i,2}$: 端末 A 以外の複数の端末がフレームを送信し、フレーム衝突が発生

事象 $\tilde{F}_{i,1}$ において、フレームを送信した端末がタイプ j に属する事象を $\tilde{F}_{i,1}^{(j)}$ とすると

$$P(\tilde{F}_{i,1}^{(j)}) = \tilde{N}_j(i)(1 - e^{-r_j T_s})e^{-\sum_{k=1}^I \tilde{N}_k(i)r_k T_s + r_j T_s}(1 - (1 - p_e)^{D_j}).$$

$\tilde{F}_{i,1}^{(1)}, \dots, \tilde{F}_{i,1}^{(I)}$ は互いに背反な事象であるから

$$P(\tilde{F}_{i,1}) = \sum_{j=1}^I \tilde{N}_j(i)(1 - e^{-r_j T_s})e^{-\sum_{k=1}^I \tilde{N}_k(i)r_k T_s + r_j T_s}(1 - (1 - p_e)^{D_j}).$$

次に、事象 $\tilde{F}_{i,2}$ において、タイプ 1 からタイプ $j-1$ のどの端末も送信を行わないが、タイプ j の端末がフレームを送信し、送信に失敗する事象を $\tilde{F}_{i,2}^{(j)}$ とすると

$$\begin{aligned} P(\tilde{F}_{i,2}^{(j)}) &= e^{-\sum_{k=1}^{j-1} \tilde{N}_k(i)r_k T_s} \left(1 - e^{-\tilde{N}_j(i)r_j T_s} - \tilde{N}_j(i)(1 - e^{-r_j T_s})e^{-\sum_{k=j}^I \tilde{N}_k(i)r_k T_s + r_j T_s} \right) \\ &= e^{-\sum_{k=1}^{j-1} \tilde{N}_k(i)r_k T_s} (1 - e^{-\tilde{N}_j(i)r_j T_s}) - \tilde{N}_j(i)(1 - e^{-r_j T_s})e^{-\sum_{k=1}^I \tilde{N}_k(i)r_k T_s + r_j T_s}. \end{aligned}$$

$\tilde{F}_{i,2}^{(1)}, \dots, \tilde{F}_{i,2}^{(I)}$ は互いに背反な事象であるから

$$\begin{aligned} P(\tilde{F}_{i,2}) &= \sum_{j=1}^I P(\tilde{F}_{i,2}^{(j)}) \\ &= 1 - e^{-\sum_{j=1}^I \tilde{N}_j(i)r_j T_s} \\ &\quad - \sum_{j=1}^I \tilde{N}_j(i)(1 - e^{-r_j T_s})e^{-\sum_{k=1}^I \tilde{N}_k(i)r_k T_s + r_j T_s}. \end{aligned}$$

以上より,

$$\begin{aligned} P(\tilde{F}_i) &= P(\tilde{F}_{i,1}) + P(\tilde{F}_{i,2}) \\ &= 1 - e^{-\sum_{j=1}^I \tilde{N}_j(i)r_j T_s} \\ &\quad - \sum_{j=1}^I \tilde{N}_j(i)(1 - e^{-r_j T_s})e^{-\sum_{k=1}^I \tilde{N}_k(i)r_k T_s + r_j T_s} (1 - p_e)^{D_j}. \end{aligned}$$

事象 $\tilde{F}_i^{(j)} \stackrel{\text{def}}{=} \tilde{F}_{i,1}^{(j)} + \tilde{F}_{i,2}^{(j)}$ のもとでのフレーム送信時間は $T_D(j)$ に等しいことから, タイプ i の端末の状態 4 の平均継続時間は以下で求められる.

$$1/\tilde{\mu}_i^c = \frac{\sum_{j=1}^I T_D(j)P(\tilde{F}_i^{(j)})}{P(\tilde{F}_i)} + EIFS.$$

タイプ i の端末 (端末 A) が (端末 A 以外の端末のフレーム送信により) キャリアセンス状態に遷移した際に, 遷移先が状態 4 である確率 p_i^f は次式で得られる.

$$p_i^f = \frac{P(\tilde{F}_i)}{1 - e^{-\sum_{j=1}^I \tilde{N}_j(i)r_j T_s}}.$$

5.4 数値評価

図 3.4 に示したシングルホップ無線 LAN シナリオを考える. 各端末は同じ無線チャネルを共用し, 等量の送信負荷で片方向の送信 (端末 \rightarrow AP) を行う. フレーム送信失敗はビットエラーの発生やフレーム衝突のどちらかにより生じるとした. シナリオ 1 は, ビットエラーが発生する無線 LAN 環境を考える. シナリオ 2 は, フレーム長の異なる 3 タイプの端末が混在する場合を考える. シナリオ 3 は, データ送信レートが異なる場合を考える. 表 5.1 にシミュレーションの条件を示す.

表 5.1: シミュレーション条件

DataRate (R_{data})	6, 24, 54 Mbps
BasicRate (R_{ack})	6 Mbps
SIFS	16 μs
DIFS	34 μs
EIFS	88 μs
SlotTime (T_s)	9 μs
CW _{min}	15
CW _{max}	1023
RetryLimit	7
FrameSize	500, 1000, 1500 bytes
BER	0, $1.0e^{-5}$, $5.0e^{-5}$, $1.0e^{-4}$
BufferSize	100 frames

5.4.1 シナリオ 1: ビットエラーが発生する無線 LAN 環境

まず、ビットエラーが発生する無線 LAN 環境において、飽和状態にある端末の台数を増やししながら、ネットワークの総スループット (図 5.2) と各端末ごとの送信失敗確率 (図 5.3) を評価した。図において実線は解析モデルによる結果、プロットはシミュレーションによる結果を表す。各端末は 1500 バイト長のデータフレームを使用しているとする。総スループット、送信失敗確率のいずれも、シミュレーションと解析モデルによる結果は良く一致している。また、ビットエラーレートが低い環境 ($BER = 0, 1.0 \times 10^{-5}$) では、端末数の増加に伴い、総スループットが減少する。このスループットの減少はフレーム衝突の頻度が増大したことによると考えられる。一方、ビットエラーレートが高い環境 ($BER = 5.0 \times 10^{-5}, 1.0 \times 10^{-4}$) では、端末数が少ない状況でも、主としてビットエラーの要因により 40% 以上の確率でフレーム送信に失敗するため、端末数の増加に伴い、ゆるやかに総スループットは増加する。

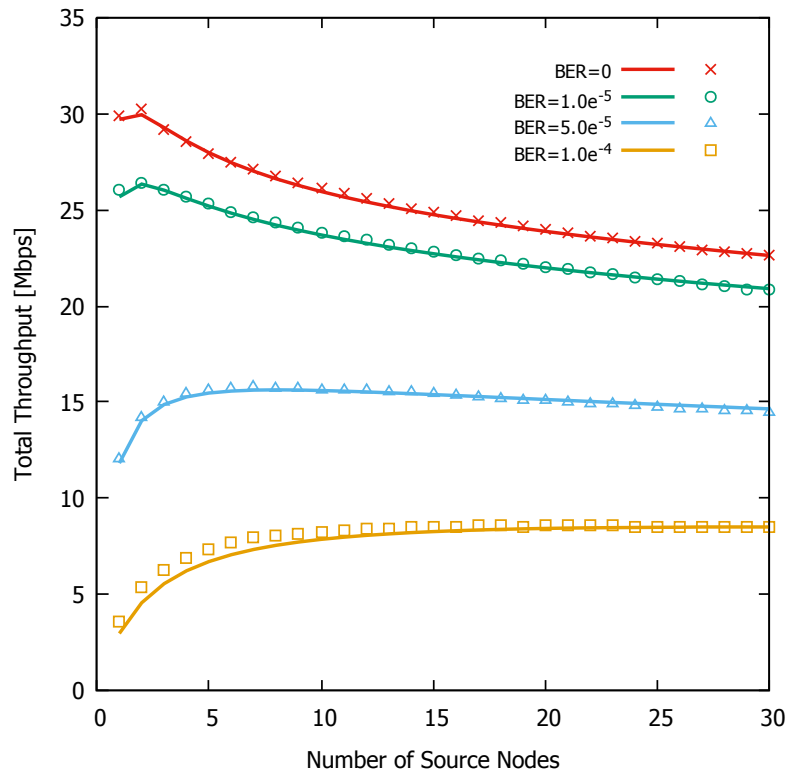


図 5.2: 総スループット, 端末数, ビットエラーレイトの関係

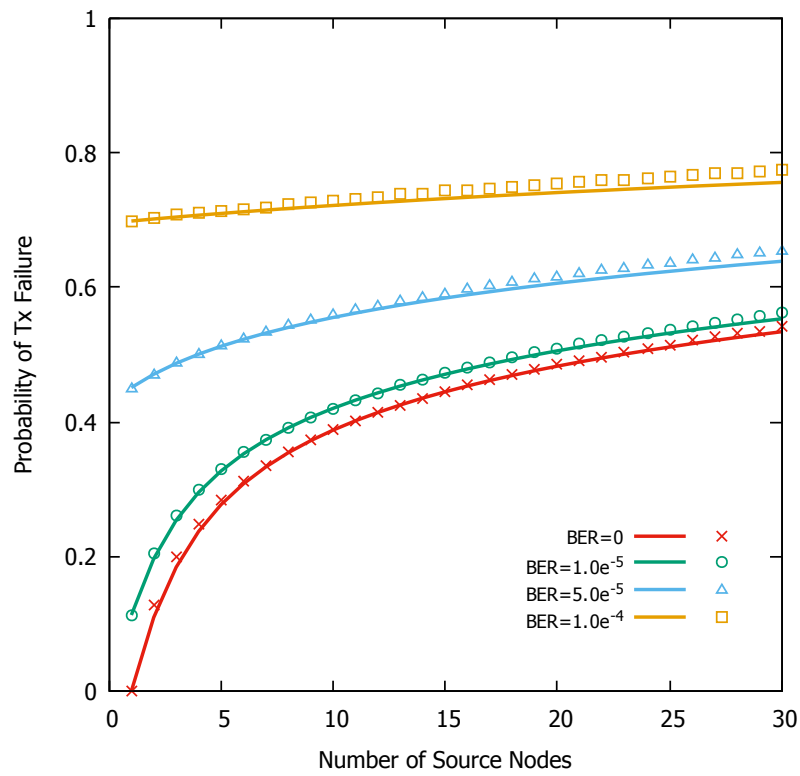


図 5.3: フレーム送信失敗確率, 端末数, ビットエラーレイトの関係

5.4.2 シナリオ 2：フレーム長が異なる場合

次に、フレーム長の異なる 3 タイプ（タイプ 1: 1500 byte, タイプ 2: 1000 byte, タイプ 3: 500 byte）の端末が混在する環境で、各タイプが飽和状態でのスループット（図 5.4）、非飽和状態でのスループット（図 5.5）と非飽和状態での平均待ち行列長（図 5.6）を評価した。いずれの場合でも、各端末のフレーム送信レートは 54Mbps とし、ビットエラーの発生によるフレーム送信失敗を考慮しない。実線は解析モデルによる結果、プロットはシミュレーションによる結果である。

飽和状態のシナリオでは、各タイプの端末の台数比を 1:1:1 としながら、総端末台数を 3 台から 30 台まで変えて、タイプ毎の総スループットを評価した。図 5.4 に示すように、シミュレーションと解析モデルによる結果は良く一致している。飽和条件では各端末の送信機会は均等に与えられるので、フレームが短いほど、得られるスループットは減少するはずであるが、予想通りの結果が得られている。このシナリオでは、端末の台数は最大で 30 台であり、衝突時のフレーム送信中の端末の組み合わせ数は膨大になるが、提案モデルを用いると、スループットは数秒で評価できる。

非飽和状態のシナリオでは、フレーム長の異なる 3 タイプの端末が 5 台ずつ存在するケースにおいて、各端末の送信データ量を揃えながら非飽和状態から飽和状態まで増加させた。図 5.5 が示すように、負荷を増加させていくと、フレームが短いほど端末は早く飽和する。これは、各端末の送信データ量が等しい場合、フレームが短いほどフレーム送信頻度が大きくなるためと考えられる。さらに負荷を上げていくと、やがて全体が飽和するが、各端末の送信機会は均等になるため、飽和状態移行後はフレームが短いほどスループットは小さくなる。

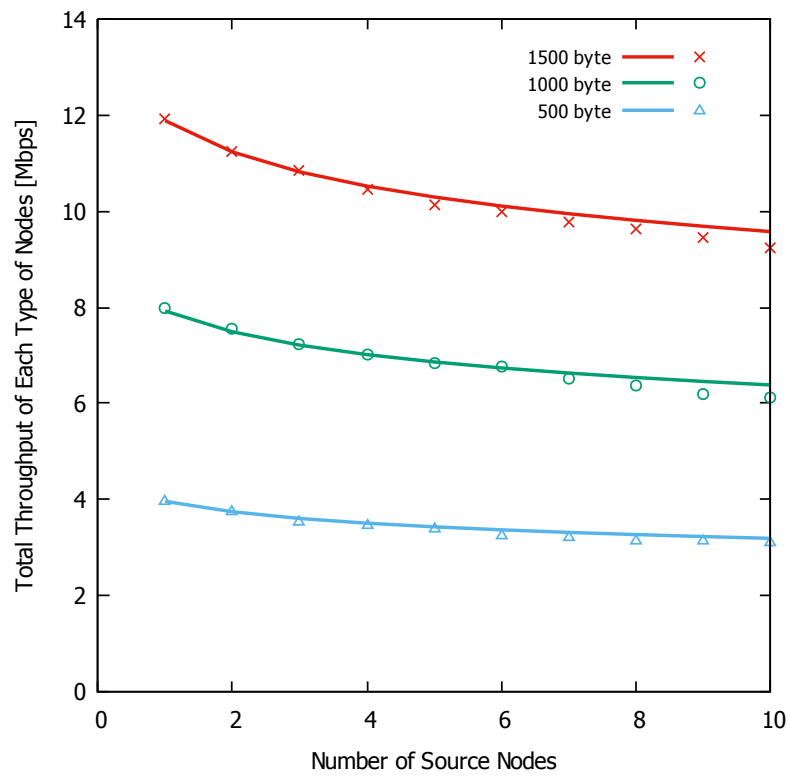


図 5.4: 各タイプの総スループット (マルチフレーム長環境: 飽和状態)

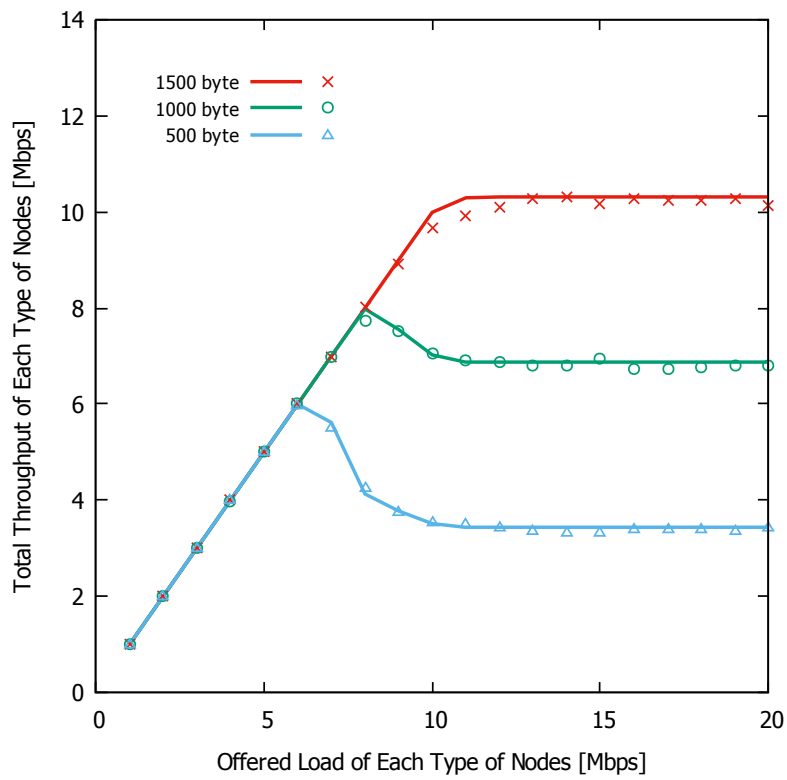


図 5.5: 各タイプの総スループット (マルチフレーム長環境: 非飽和状態)

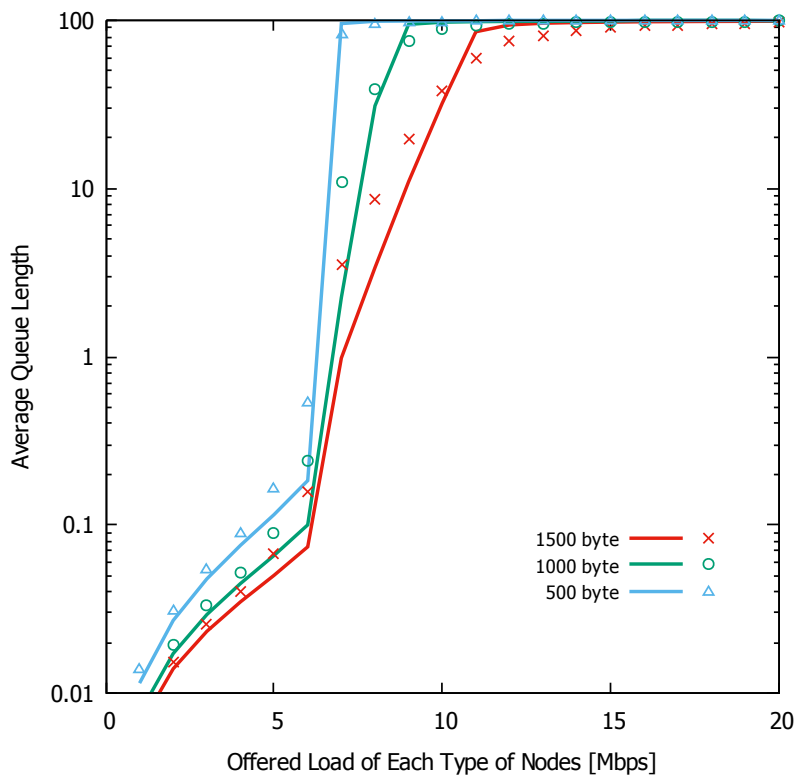


図 5.6: 各端末の平均待ち行列長 (マルチフレーム長環境: 非飽和状態)

5.4.3 シナリオ 3 : データ送信レートが異なる場合

最後に、データ送信速度が高い (54Mbps) 端末と、データ送信速度の低い (24Mbps, もしくは 6Mbps) 端末が計 5 台存在する環境において、各端末の送信負荷を揃えながら増加させたときの、各端末のスループット (図 5.7) およびフレームの平均待ち行列長 (図 5.8) を評価した。各端末は 1500 バイトのフレームを送信し、ビットエラーは発生しないものとした。図には、(1) 全て 54Mbps, (2) 1 台のみ 24Mbps, (3) 1 台のみ 6Mbps, (4) 2 台が 6Mbps の 4 通りの結果を示した。シミュレーションと解析モデルによる結果は良く一致している。また、送信レートの低い端末が混在するほどスループットが低下する。1 フレームの送信時間は、送信レートが高い端末よりも低い端末の方が長いため、高い送信レートを利用する端末のキャリアセンス時間が長くなる。これにより、無線 LAN 全端末のスループット性能は、最も通信速度の低い端末に決められる。いわゆる Performance Anomaly [46] と呼ばれる現象が確認できる。

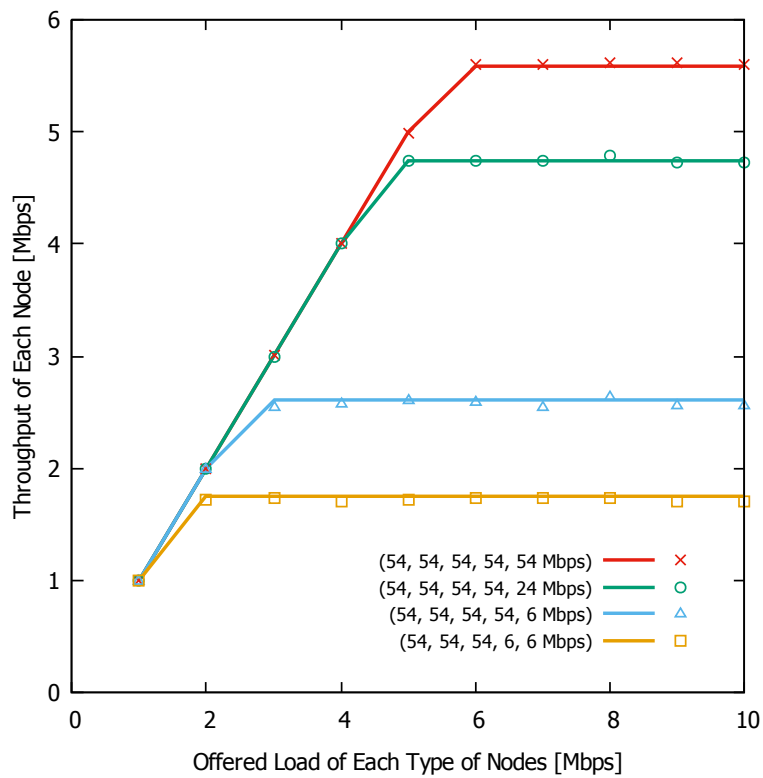


図 5.7: 各端末のスループット (マルチ送信レート環境: 非飽和状態)

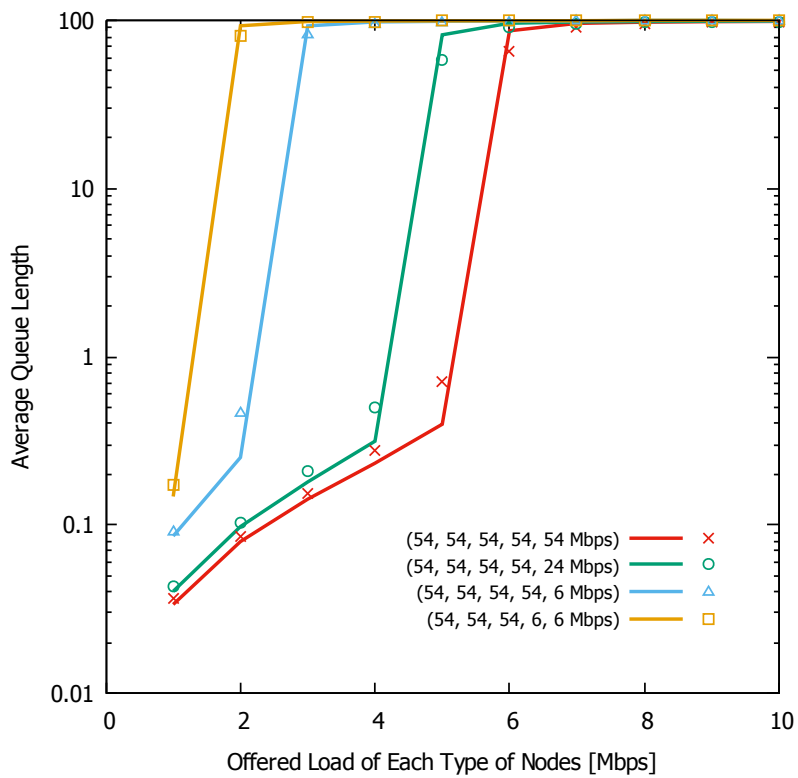


図 5.8: 各端末の平均待ち行列長 (マルチ送信レート環境: 非飽和状態)

5.5 まとめ

本章では，端末を少数のマクロ状態に縮約して表現し，状態と待ち行列長の変化を連続時間マルコフ連鎖で表現する性能解析モデルを，フレーム長やデータ送信レートが端末によって異なる場合を扱えるように拡張した．端末数が多い場合では，衝突を起こす端末の組み合わせを全て考慮して衝突時のフレーム送信時間を決定するのは容易でない．解析モデルでは，衝突時のフレーム送信時間を厳密にかつスケーラブルな計算量で評価する手法を示した．

第 6 章

結論

本論文では、IEEE 802.11 規格に基づく無線 LAN を研究対象とし、(1) 端末内のフレーム待ち行列長を考慮した非飽和状態性能評価手法、(2) テザリングユーザ密集環境における性能評価手法、(3) フレーム長やフレーム送信速度の端末依存性を考慮した性能評価手法をそれぞれ提案した。

まず「待ち行列長を考慮した非飽和状態性能評価手法」については、端末の状態を少数のマクロ状態（チャンネルアイドル状態、送信状態、キャリアセンス状態）に縮約して表現することで、端末内のフレーム待ち行列長を考慮した場合においても状態数の過度の増大を抑えられ、端末の状態と待ち行列長の変化を連続時間マルコフ連鎖で追うことが可能になる。端末間の相互関係が平均場近似により表現することで、端末ごとに定常状態確率を計算する手法を採用した。これにより、従来、難解であった非飽和状態におけるフレーム待ち行列長の解析が容易になることを示した。数値評価により、解析モデルで用いた指数分布の仮定（マルコフモデルに従うとする仮定）は、IEEE 802.11 システムのスループット性能などを解析的に評価する際の本質的な誤差要因とはならないことを確認した。

次いで、上記の性能評価手法を「テザリングユーザ密集環境における性能評価手法」に適用した。本論文では、複数のテザリングユーザが互いに近くにいる状況を想定し、上記の性能評価手法を適用することで、これまで扱いが難しかった条件でのスループット性能解析が可能になることを示した。IEEE 802.11 無線 LAN では、各端末がチャンネルの使用状況に応じて自律分散的にフレーム送信タイミングを決定する DCF が用いられる。隣接する無線 LAN との位置関係により、無線 LAN のスループット性能を大きく影響する可能性がある。提案モデルは、複数のテザリングユーザが存在する環境では、テザリングユーザ間の電波干渉により、特定のユーザ端末のスループットが極端に低下する現象がみられることを示した。

最後に、上記の性能評価手法を各端末のフレーム送信時間が異なるケースを扱えるように拡張した。フレーム衝突時のフレーム送信時間（フレーム送信中の端末によりチャンネル

が占有されている時間)は, 衝突にあったフレームのうち送信に最も時間がかかるフレームの送信時間に等しい. 衝突を起こす端末の組み合わせを全て考慮して, 衝突時のフレーム送信時間を決定するのは容易でなく, 端末数が増えると衝突を起こす端末の組み合わせも爆発的に増える. 提案モデルは, 送信時にビットエラーによる送信失敗の影響を考慮し, 衝突する際のフレーム送信時間を, 厳密にかつ少ない計算量で効率的に評価することを示した.

今後の課題として, (1) 隠れ端末問題を扱えるモデルへの拡張, (2) 複数無線 LAN 存在環境での特定のアプリケーションの品質保証技術 (3) フレーム長やデータ伝送レートが確率的に変化する場合への拡張, 等が考えられる.

付録 A

平衡方程式 (3.1), (3.2), (3.3) の解き方

式 (3.2) より, $\pi_i(0, 0^*)$ を用いて, $\pi_i(0, 3^*)$, $\pi_i(0, 4^*)$ と $\pi_i(0, 0)$ を次のように計算する.

$$\begin{aligned}\pi_i(0, 3^*) &= \frac{\gamma_i(1 - p_i^f)}{\lambda_i + \tilde{\mu}_i^s} \pi_i(0, 0^*), \\ \pi_i(0, 4^*) &= \frac{\gamma_i p_i^f}{\lambda_i + \tilde{\mu}_i^c} \pi_i(0, 0^*), \\ \pi_i(0, 0) &= \left[(\lambda_i + \gamma_i) - \frac{\tilde{\mu}_i^s(1 - a_i)\gamma_i(1 - p_i^f)}{\lambda_i + \tilde{\mu}_i^s} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\tilde{\mu}_i^c \gamma_i p_i^f}{\lambda_i + \tilde{\mu}_i^c} \right] \frac{\pi_i(0, 0^*)}{\nu_i}.\end{aligned}$$

$\pi_i(0, 0)$ が得られたことにより, 式 (3.2) の 4 番目と 5 番目の式で $\pi_i(0, 3)$ と $\pi_i(0, 4)$ が次で求められる.

$$\pi_i(0, 3) = \frac{\gamma_i(1 - p_i^f)}{\lambda_i + \tilde{\mu}_i^s} \pi_i(0, 0), \quad \pi_i(0, 4) = \frac{\gamma_i p_i^f}{\lambda_i + \tilde{\mu}_i^c} \pi_i(0, 0).$$

次に, 式 (3.2) の各式の左辺と右辺を合わせることで, 以下の式が得られる.

$$\begin{aligned}\lambda_i \pi_i(0) + \tilde{\mu}_i^s a_i (\pi_i(0, 3) + \pi_i(0, 3^*)) &= \mu_i^s \pi_i(1, 1), \\ \pi_i(0) &\stackrel{\text{def}}{=} \sum_{l=0}^4 \pi_i(0, l) + \pi_i(0, 3^*) + \pi_i(0, 4^*).\end{aligned}$$

従って, $\pi_i(1, 1)$ は次のように求める.

$$\pi_i(1, 1) = \frac{\lambda_i \pi_i(0) + \tilde{\mu}_i^s a_i (\pi_i(0, 3) + \pi_i(0, 3^*))}{\mu_i^s}.$$

$\pi_i(1, 1)$ が既知のため、式 (3.1) の 2 番目の式より、 $\pi_i(1, 0)$ が求められる。

$$\pi_i(1, 0) = \frac{\lambda_i + \mu_i^s}{\nu_i(1 - p_i^t)} \pi_i(1, 1) - \frac{\lambda_i}{\nu_i} \pi_i(0, 0^*) - \frac{\tilde{\mu}_i^s a_i}{\nu_i} \pi_i(0, 3^*). \quad (\text{A.1})$$

$\pi_i(1, 0)$ を用いて、式 (3.1) の 3, 4, 5 番目の式より $\pi_i(1, 2)$, $\pi_i(1, 3)$ と $\pi_i(1, 4)$ が得られる。そして、式 (3.1) の左辺と右辺の総和を取ることで、次が得られる。

$$\lambda_i \pi_i(1) + \mu_i^s a_i \pi_i(1, 3) = \mu_i^s \pi_i(2, 1), \quad \pi_i(1) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{l=0}^4 \pi_i(1, l). \quad (\text{A.2})$$

よって、 $\pi_i(2, 1)$ が求められる。

$$\pi_i(2, 1) = \frac{\lambda_i \pi_i(1) + \tilde{\mu}_i^s a_i \pi_i(1, 3)}{\mu_i^s}. \quad (\text{A.3})$$

以降、同様の手順で $\pi_i(j, l)_{j=2}^{(K_i-1)}$ が漸化的に計算できる。 $\pi_i(K_i, 1)$ を以下のように求める。

$$\pi_i(K_i, 1) = \frac{\lambda_i \pi_i(K_i - 1) + \tilde{\mu}_i^s a_i \pi_i(K_i - 1, 3)}{\mu_i^s}.$$

式 (3.3) の 2 番目の式から、 $\pi_i(K_i, 0)$ が求められる。

$$\pi_i(K_i, 0) = \frac{\mu_i^s}{\nu_i(1 - p_i^t)} \pi_i(K_i, 1) - \frac{\lambda_i}{\nu_i(1 - p_i^t)} \pi_i(K_i - 1, 1).$$

その後、式 (3.3) の 3, 4, 5 番目の式より、 $\pi_i(K_i, 2)$, $\pi_i(K_i, 3)$ と $\pi_i(K_i, 4)$ が得られる。 $\pi_i(0, 0^*)$ の値は、全確率が 1 であることから最終的に求める。

謝辞

本論文は筆者が千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。

研究を進めるにあたり、多くの方々からご指導いただいたことを感謝いたします。研究に関して適切にご指導をくださり、その他にも様々な面でお世話になりました塩田茂雄教授に深く感謝いたします。

本論文をまとめるに際し、有益なるご助言を頂きました、主査の同専攻教授須貝康雄先生、副主査の同専攻准教授吉村博幸先生、ならびに、副主査の同大学院融合科学研究科准教授関屋大雄先生に深謝の意を表します。

また、本研究で使用した無線 LAN シミュレータのソースコードを快くご提供下さった、千葉大学の関屋大雄先生、小室信喜先生に深謝する。

研究を進める上で、無線 LAN 性能評価を専攻する研究者同士と交流する場をお作り、有益なご助言を頂きました名古屋大学情報基盤センターの村瀬勉教授に感謝いたします。

さらに、留学生活にご支援を頂きました塩田研究室の皆様と切磋琢磨しながら研究をできたことを非常に貴重な経験だと思えます。誠にありがとうございました。

末筆ながら、これまでの人生で迷惑をかけてきました両親および支援を頂きました家族に感謝の言葉を残したいと思えます。

参考文献

- [1] S. Sagari, A. Baid, I. Seskar, T. Murase, M. Oguchi, and D. Raychaudhuri, “Performance evaluation of mobile hotspots in densely deployed WLAN environments,” in *PIMRC*, pp. 2935–2939. IEEE, 2013.
- [2] “無線 LAN における“電波干渉の影響”とは,” <http://www.keyman.or.jp/kc/30007662/>.
- [3] G. Bianchi, “Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, 2000.
- [4] “Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications,” *IEEE Standard 802.11-2007 edition*, 2007.
- [5] 守倉正博, 久保田周治, *802.11 高速無線 LAN 教科書*, 2008.
- [6] D. Malone, K. Duffy, and D. Leith, “Modeling the 802.11 distributed coordination function in nonsaturated heterogeneous conditions,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 15, no. 1, pp. 159–172, 2007.
- [7] 大和田泰伯, 照井宏康, 間瀬憲一, 今井博英, “マルチホップ無線 LAN の提案と実装,” *電子情報通信学会論文誌 B*, vol. 89, no. 11, pp. 2092–2102, 2006.
- [8] H. Zhai, Y. Kwon, and Y. Fang, “Performance analysis of IEEE 802.11 MAC protocols in wireless LANs,” *Wireless Commu. Mobile Computing*, vol. 4, no. 8, pp. 917–931, 2004.
- [9] M. Garetto and C.-F. Chiasserini, “Performance analysis of 802.11 WLANs under sporadic traffic,” in *Networking 2005*, pp. 1343–1347, 2005.
- [10] A. Kumar, E. Altman, D. Miorandi, and M. Goyal, “New insights from a fixed point analysis of single cell IEEE 802.11 WLANs,” in *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, vol. 3, pp. 1550–1561, 2005.
- [11] I. S. Hwang and C. A. Chen, “Saturation throughput analysis in IEEE 802.11 DCF using semi-markov model,” *International Mathematical Journal*, vol. 1, no. 5-8, pp. 289–296, 2006.
- [12] C. Foh, M. Zukerman, and J. Tantra, “A markovian framework for performance evaluation

- of IEEE 802.11,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 4, 2007.
- [13] O. Tickoo and B. Sikdar, “Modeling queueing and channel access delay in unsaturated IEEE 802.11 random access MAC based wireless networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 16, no. 4, pp. 878–891, 2008.
- [14] Y. Bae, K. Kim, M. Moon, and B. Choi, “Analysis of IEEE 802.11 non-saturated DCF by matrix analytic methods,” *Annals of Operations Research*, vol. 162, no. 1, pp. 3–18, 2008.
- [15] K. Ghaboosi, B. Khalaj, Y. Xiao, and M. Latva-aho, “Modeling IEEE 802.11 DCF using parallel space–time markov chain,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 4, pp. 2404–2413, 2008.
- [16] Q. Zhao, D. Tsang, and T. Sakurai, “A simple and approximate model for nonsaturated IEEE 802.11 DCF,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 8, no. 11, pp. 1539–1553, 2009.
- [17] R. Liu, G. Sutton, and I. Collings, “A new queueing model for qos analysis of IEEE 802.11 DCF with finite buffer and load,” *IEEE Trans. Wireless Communications*, vol. 9, no. 8, pp. 2664–2675, 2010.
- [18] E. Felemban and E. Ekici, “Single hop IEEE 802.11 DCF analysis revisited: Accurate modeling of channel access delay and throughput for saturated and unsaturated traffic cases,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 10, pp. 3256–3266, 2011.
- [19] 黄重陽, 塩田茂雄, “マルコフ連鎖と待ち行列モデルを組み合わせた無線 LAN 用性能評価モデル,” *電子情報通信学会論文誌 B*, vol. 95, no. 2, pp. 119–129, 2012.
- [20] G. Martorell, G. Femenias, and F. Riera-Palou, “A refined 3D markov model for non-saturated IEEE 802.11 DCF networks,” in *IFIP Wireless Days*, pp. 1–8, 2013.
- [21] Y. Barowski, S. Biaz, and P. Agrawal, “Towards the performance analysis of IEEE 802.11 in multi-hop ad-hoc networks,” *Wireless Communications and Networking Conference*, vol. 1, pp. 100–106, 2005.
- [22] Y. Gao, D.-M. Chiu, and J. Lui, “Determining the end-to-end throughput capacity in multi-hop networks: methodology and applications,” in *ACM SIGMETRICS/Performance*, pp. 39–50, 2006.
- [23] P. Ng and S. Liew, “Throughput analysis of IEEE802.11 multi-hop Ad Hoc networks,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 15, no. 2, pp. 309–322, 2007.
- [24] M. Xie and M. Haenggi, “Towards an end-to-end delay analysis of wireless multihop networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 5, pp. 849–861, 2009.
- [25] N. Bisnik and A. Abouzeid, “Queueing network models for delay analysis of multihop

- wireless ad hoc networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 1, pp. 79–97, 2009.
- [26] Y. Cheng, H. Li, P.-J. Wan, and X. Wang, “Wireless mesh network capacity achievable over the csma/ca mac,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 7, pp. 3151–3165, 2012.
- [27] K. Sanada, J. Shi, N. Komuro, and H. Sekiya, “End-to-end delay analysis for IEEE 802.11 string-topology multi-hop networks,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. 98, no. 7, pp. 1284–1293, 2015.
- [28] H. Bui, K. Sanada, N. Komuro, S. Shioda, S. Sakata, K. Miyoshi, and T. Murase, “Throughput analysis of wireless networks with tethering function,” in *IEEE WCNC workshop*, pp. 125–130, 2015.
- [29] ブイミンファイ, 眞田耕輔, 小室信喜, 阪田史郎, 塩田茂雄, 三好一穂, 村瀬勉, 関屋大雄, “テザリング端末の存在する無線ネットワークのスループット解析,” *電子情報通信学会技術研究報告*, vol. 114, no. 418, pp. 231–236, 2015.
- [30] 万胤, 眞田耕輔, 小室信喜, “フレーム長の異なるフローが共存するテザリングネットワークにおけるスループット解析,” *電子情報通信学会技術研究報告*, vol. 115, no. 300, pp. 81–86, 2015.
- [31] Y. Wan, K. Sanada, N. Komuro, G. Motoyoshi, N. Yamagaki, S. Shioda, S. Sakata, T. Murase, and H. Sekiya, “Throughput analysis of WLANs in saturation and non-saturation heterogeneous conditions with airtime concept,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. 99, no. 11, pp. 2289–2296, 2016.
- [32] B. Nardelli and E. Knightly, “Closed-form throughput expressions for CSMA networks with collisions and hidden terminals,” in *IEEE INFOCOM*, pp. 2309–2317, 2012.
- [33] B. Bellalta, A. Checco, A. Zocca, and J. Barcelo, “On the interactions between multiple overlapping WLANs using channel bonding,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 2, pp. 796–812, 2016.
- [34] S. Liew, C. Kai, H. Leung, and P. Wong, “Back-of-the-envelope computation of throughput distributions in CSMA wireless networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 9, no. 9, pp. 1319–1331, 2010.
- [35] L. Dai and X. Sun, “A unified analysis of IEEE 802.11 DCF networks: stability, throughput, and delay,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 12, no. 8, pp. 1558–1572, 2013.
- [36] R. Laufer and L. Kleinrock, “On the capacity of wireless CSMA/CA multihop networks,” in *IEEE INFOCOM*, pp. 1312–1320, 2013.
- [37] P. Chatzimisios, A. Boucouvalas, and V. Vitsas, “Influence of channel BER on IEEE 802.11 DCF,” *Electronics letters*, vol. 39, no. 23, pp. 1687–1689, 2003.

- [38] P. Chatzimisios, A. Boucouvalas, and V. Vitsas, "Performance analysis of IEEE 802.11 DCF in presence of transmission errors," in *IEEE International Conference on Communications*, vol. 7, pp. 3854–3858, 2004.
- [39] X. Dong and P. Varaiya, "Saturation throughput analysis of IEEE 802.11 wireless LANs for a lossy channel," *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 2, pp. 100–102, 2005.
- [40] X. Li and Q. Zeng, "Influence of bit error rate on the performance of IEEE 802.11 MAC protocol," in *WCNC 2007*, pp. 367–372, 2007.
- [41] R. Liu, G. Sutton, X. Yang, and I. Collings, "Modelling QoS performance of IEEE 802.11 DCF under practical channel fading conditions," in *IEEE ICC*, pp. 1–6, 2011.
- [42] G. Sutton, R. Liu, and I. Collings, "Modelling IEEE 802.11 DCF heterogeneous networks with rayleigh fading and capture," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 8, pp. 3336–3348, 2013.
- [43] C. Bordenave, D. McDonald, and A. Proutiere, "Random multi-access algorithms : a mean field analysis," *In Proceedings of Allerton conference*, 2005.
- [44] C. Bordenave, D. McDonald, and A. Proutiere, "Performance of random medium access control an asymptotic approach," *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, vol. 36, no. 1, pp. 1–12, 2008.
- [45] "The original simulator," <http://www.s-lab.nd.chiba-u.jp/link/simulator.htm>, accessed: 2016-5-24.
- [46] M. Heusse, F. Rousseau, G. Berger-Sabbatel, and A. Duda, "Performance anomaly of 802.11b," in *INFOCOM 2003*, vol. 2, pp. 836–843, 2003.

研究業績一覧

原著論文

- (1) X. LI, Y. Narita, Y. Gotoh, and S. Shioda, "Performance analysis of IEEE 802.11 DCF based on a macroscopic state description," IEICE Trans. Commun. Vol. E101-B, No. 8, 2018. (掲載決定)

国際会議

- (1) X. Li et al., "Light-weight performance analysis of Wi-Fi offload using mean-field approximation," The 21st Asia-Pacific Conference on Communications, 2015.

国内学会

- (1) 李想, 後藤優太, 塩田茂雄, "フレーム長の端末依存性を考慮したマクロ状態表現による IEEE 802.11 DCF 性能評価モデル," 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会, NS2016-243, 2017 年 3 月 3 日 (沖縄) (5 章) .
- (2) 李想, 後藤優太, 塩田茂雄, "マクロ状態表現による IEEE 802.11 DCF 性能評価モデル," 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-11-31, 2016 年 9 月 22 日 (札幌) .
- (3) 成田侑樹, 李想, 後藤優太, 塩田茂雄, 小室信喜, 関屋大雄, 阪田史郎, 村瀬勉, 本吉彦, 山垣則夫, "連続時間マルコフ連鎖を用いた Wi-Fi 性能評価法の提案と Wi-Fi 間干渉評価," 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2015 年度待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」, 2016 年 1 月 21 日 (東京) (4 章) .
- (4) 成田侑樹, 李想, 後藤優太, 塩田茂雄, 小室信喜, 関屋大雄, 阪田史郎, 村瀬勉, 本吉彦, 山垣則夫, "連続時間マルコフ連鎖による IEEE 802.11 DCF 用性能評価モデル," 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会, NS2015-125, 2015 年 11 月 27 日 (新潟) .

- (5) 後藤優太, 成田侑樹, 李想, 塩田茂雄, 小室信喜, 関屋大雄, 阪田史郎, 村瀬勉, 本吉彦, 山垣則夫, "テザリングユーザ密集環境におけるスループット性能異常," 電子情報通信学会 ソサエティ大会, B-6-36, 2015 年 9 月 9 日 (仙台) .
- (6) X. Li, Y. Narita, Y. Goto, S. Shioda, N. Komuro, H. Sekiya, S. Sakata, K. Miyoshi, T. Murase, "A simple model and analysis of Wi-Fi tethering with offloading through Wi-Fi access network," 電子情報通信学会 総合大会, 2015 年 3 月 (大津) .
- (7) 李想, 塩田茂雄, 阪田史郎, 村瀬勉, "無線マルチホップネットワークにおける動的 ROC による優先フロー QoS 保証," 電子情報通信学会 ソサエティ大会, B-6-65, 2013 年 9 月 (福岡) .