

修士論文

IEEE 802.15.7 可視光通信ネットワークにおける
改良型バックオフ手法の提案および
理論解析に基づく性能評価に関する研究

令和3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

澤 優太

三重大学大学院 工学研究科

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 関連研究	6
2.1 VLC ネットワーク	6
2.1.1 VLC の歴史とその技術動向	6
2.1.2 IEEE 802.15.7	8
2.1.2.1 PHY 層に関する技術概要	8
2.1.2.2 MAC 層に関する技術概要	8
2.1.3 無線ネットワークにおけるチャンネルアクセス	9
2.1.3.1 IEEE 802.11 DCF	10
2.1.3.2 IEEE 802.15.4およびIEEE 802.15.7におけるCSMA/CA 方式	11
2.1.4 VLC ネットワークにおける隠れ端末問題	12
2.2 VLC ネットワークへの無線全二重通信の適用	14
2.2.1 無線通信への無線全二重通信の実装	14

2.2.2	FD VLC ネットワークにおける隠れ端末問題の解消方法	15
2.2.3	FD VLC ネットワークにおける MAC プロトコル	16
2.2.4	FD VLC ネットワークにおける問題点	17
2.3	数理モデルに基づくネットワークシステムの性能解析	18
2.3.1	IEEE 802.11 ネットワークにおける理論解析	18
2.3.1.1	飽和ネットワークにおける理論解析	18
2.3.1.2	非飽和ネットワークにおける理論解析	20
2.3.2	IEEE 802.15.7 における理論解析	22
2.3.2.1	IEEE 802.15.7 の動作を考慮した理論解析	22
2.3.2.2	FD-RTS/CTS 方式の動作を考慮した理論解析	23
第 3 章 FD VLC ネットワークにおけるパケット破棄を抑制するバックオフ手 法		36
3.1	システムモデル	36
3.2	改良型バックオフ手法	37
第 4 章 数理モデルに基づく改良型バックオフ手法における性能解析		42
4.1	解析の仮定	42
4.2	改良型バックオフ手法を考慮した解析モデルの構築	43
4.2.1	改良型バックオフ手法を考慮したマルコフ連鎖モデル	43
4.2.2	改良型バックオフ手法における状態遷移確率	45
4.2.3	マルコフ連鎖モデルにおける定常状態確率	46
4.2.4	CCA 確率の導出	48
4.2.5	衝突率の導出	49
4.2.6	チャンネルビジー率の導出	49

4.2.7	代数方程式とその数値的導出方法	50
4.3	ネットワーク性能の数理化	50
4.3.1	パケット破棄率の導出	51
4.3.2	アクセス遅延の導出	51
4.3.3	ネットワークスループットの導出	51
第5章	改良型バックオフ手法の性能評価	54
5.1	評価条件	54
5.1.1	評価環境	54
5.1.2	評価項目	55
5.1.3	評価対象	56
5.2	ネットワークのトラヒック負荷に対する性能評価	56
5.2.1	トラヒック負荷に対するパケット破棄率	56
5.2.2	トラヒック負荷に対するネットワークスループット	57
5.2.3	トラヒック負荷に対するアクセス遅延	57
5.2.4	パケット破棄が発生しない環境でのアクセス遅延	58
5.3	改良型バックオフ手法における最大維持回数に対する性能評価	59
5.3.1	最大再送回数に対するパケット破棄率	59
5.3.2	最大再送回数に対するネットワークスループット	59
5.3.3	最大再送回数に対するアクセス遅延	60
5.3.4	最適な最大維持回数の導出	60
第6章	まとめ	71
	参考文献	74

謝辭	80
研究業績	81

目 次

2.1	IEEE 802.11 DCF におけるチャネルアクセス例	27
2.2	IEEE 802.15.4 および IEEE 802.15.7 におけるチャネルアクセス例	28
2.3	無線通信における隠れ端末問題	29
2.4	VLC ネットワークにおける隠れ端末問題	30
2.5	FD VLC ネットワークにおける隠れ端末問題を回避するネットワーク例	31
2.6	FD-RTS/CTS 方式におけるチャネルアクセス例	32
2.7	IEEE 802.11 の動作を考慮したマルコフ連鎖モデル	33
2.8	IEEE 802.15.7 の動作を考慮したマルコフ連鎖モデル	34
2.9	FD-RTS/CTS 方式の動作を考慮したマルコフ連鎖モデル	35
3.1	本研究の対象ネットワークトポロジ	39
3.2	改良型バックオフ手法のフローチャート	40
3.3	改良型バックオフ手法におけるチャネルアクセス例	41
4.1	改良型バックオフ手法を考慮したマルコフ連鎖モデル	53
5.1	端末台数 $N = 5$ におけるトラフィック負荷に対するパケット破棄率	63
5.2	端末台数 $N = 5$ におけるトラフィック負荷に対するネットワークスルー プット	64

5.3	端末台数 $N = 5$ におけるトラヒック負荷に対するアクセス遅延	65
5.4	端末台数 $N = 5$ におけるパケット破棄が発生しない環境でのアクセス遅延	66
5.5	端末台数 $N = 5$ におけるトラヒック負荷と最大維持回数に対するパケット破棄率	67
5.6	端末台数 $N = 5$ におけるトラヒック負荷と最大維持回数に対するネットワークスループット	68
5.7	端末台数 $N = 5$ におけるトラヒック負荷と最大維持回数に対するアクセス遅延	69

表 目 次

5.1 シミュレーション諸元	62
5.2 最適な最大維持回数とスループット利得	70

第1章

序論

1.1 研究背景

近年、スマートフォンなどの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。このように増大するデータトラフィック量や様々な用途にいかに対応するかが情報通信分野全体の課題である。また、情報通信端末は今後、爆発的に増加することが予想されており、それに伴い、特に無線周波数帯域の圧迫は大きな課題となっている。そこで、電波の代わりに可視光を用いて通信を行う可視光通信 (Visible Light Communication: VLC) が注目されている [1]。VLC とは、人間が視認できる周波数帯の可視光を用いた無線通信技術であり、LED(Light Emitting Diode) やレーザダイオード (Laser Diode: LD) などを用いて人の目には分からないほど高速に点滅させ通信を行う [2]。これまでの無線通信では電波 (3 THz 以下) を用いる通信が一般的であった。しかし、LED 技術の急速な発展によって可視光帯域 (380-780 THz) を利用した無線通信が実用可能な段階となり、これらの VLC 技術の応用、関連研究が近年特に注目されている [3]。VLC における利点としては、可視光の指向性により信号の傍受や盗聴が困難であるため高い秘匿性が得られること、広帯域な可視光通信の特性により高速な通信が可能であること、人体や精密機器への電磁波障害を引き起こさず安全な運用が可能であることなどが

挙げられる [4], [5]. VLC 技術が特に注目している重要な要素として, 電波帯域を使用せず可視光の広帯域を用いて大容量通信が可能であることであり, これまで情報通信分野が抱えていた周波数帯域圧迫の解消に大いに期待されている. また, 既存の電波通信と併用して VLC を用いることにより, さらに周波数帯域の圧迫を解消できると期待されているため, 近年多くの研究がなされている [6]-[8].

このような背景から, 米国電気電子学会 IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) は短距離光無線通信のための標準規格として IEEE 802.15.7 を策定した [9]. IEEE 802.15.7 における媒体アクセス制御 (Medium Access Control: MAC) 層では, 他端末からの干渉や複数端末の同時送信による信号衝突を回避するために, 搬送波検知多重アクセスの衝突回避方式 (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance: CSMA/CA) 方式が採用されている. 一般的に, CSMA/CA 方式に基づくチャネルアクセスは, ① 送信を行う端末が事前に近隣端末のチャネルの使用状況を確認し, チャネルが使用されている (チャネルビジー) 時は送信を控える, ② 複数の端末が同時送信することによって発生する通信の衝突を回避するために送信開始までの待機時間を分散させるように設計されている. しかし, 可視光での送信信号は高い指向性を持ち, 限られた方向にのみ伝搬する. そのため, 近隣端末のチャネル使用状況を検出することが困難となり, その結果, ネットワーク内において通信の衝突が頻繁に発生する. このように CSMA を用いたネットワークにおいて, 近隣端末のチャネル使用状況を検出できず通信の衝突を招く問題を「隠れ端末問題」と呼ぶ. VLC ネットワークでは特に, 可視光の高い指向性に起因した, 隠れ端末問題により, 著しい情報通信性能劣化を引き起こす [10]-[12].

上記の VLC ネットワークにおける隠れ端末問題による深刻な情報通信性能の劣化に対する有効な対策として, 無線全二重通信の適用が検討されている. 一般的に無線全二重通信とは同一周波数帯で信号の送受信を同時に行う技術である [13]. 無線

全二重通信の特徴として、まず注目されるのは理論上2倍の情報通信容量を得ることができる点であるが、この技術をCSMAネットワークへ適用することにより、信号の受信端末が同時に信号送信を行うことで、送信端末と隠れ端末の関係にある端末に通信状況を間接的に知らせることが可能である。その結果、ネットワークにおける隠れ端末による衝突を回避でき、システム性能を向上させることができる。このように、無線全二重通信のもう一つの特徴として、隠れ端末による衝突の抑制機能が挙げられ、特にVLCネットワークと無線全二重通信技術との相性は良く、無線全二重可視光通信ネットワーク (Full Duplex VLC: FD VLC) に関する研究が注目されている [12], [14]-[17].

VLCネットワークへの無線全二重通信の適用により、隠れ端末問題による衝突は著しく抑制することができる一方で、その副作用として性能劣化を招く新たな問題が生じる。IEEE 802.15.7 FD VLCネットワークでは、送信前にランダムな待機時間を設定するバックオフ機構を採用している。この待機時間は、0からCW(Contention Window)と呼ばれる固定値の範囲からランダムに選択される。CSMAでは一般的に、CW値は衝突する度に元の値の2倍の値とする(指数バックオフ)ことで、端末間での送信までの待機時間を分散させて衝突を回避する。IEEE 802.15.7におけるバックオフのCW値はバックオフ指数(Backoff Exponent: BE)とバックオフ回数(Number of Backoff stages: NB)の値によって決定される。IEEE 802.15.7におけるバックオフの特徴的な動作として、送信フレームの衝突時だけでなく、チャネルビジー判定時においてもBEおよびNB値の調整(増加)が行われる。また、NB値が規定された基準値を超えた場合、その送信パケットは破棄される。端末が送信を行っている最中に、受信端末が無線全二重通信を用いて信号を送信することで、送信端末の隠れ端末はチャネルビジーと判定し、衝突を抑制させることができる。しかし、チャネルビジー判定後にBEとNBの値を増加させるため、全ての送信に対して全二

重通信を行うことで、NB 値の増加促進を招き、その結果、基準値超過によるパケット破棄が頻繁に生じる。この過度なパケット破棄によって受信できる情報量が減少、すなわち、スループット性能の低下を引き起こす。そのため、FD VLC ネットワークにおいてパケット破棄を抑制する適切なバックオフ手法の検討が必要である。

1.2 本研究の目的

本研究では、FD VLC ネットワークにおけるパケット破棄を抑制することでネットワークにおけるスループット向上を目的とし、改良型バックオフ手法を提案する。前節にて説明した過度なパケット破棄の原因は、IEEE 802.15.7 のバックオフ機構における「チャネルビジー判定後の BE と NB 値の増加」の動作にある。したがって、提案手法では端末がチャネルビジー判定および衝突時に増加させていた BE と NB の値をチャネルビジー判定には増加させず、チャネル状態を確認する前に設定していた BE と NB の値を引き継ぐ。提案手法により、端末の BE と NB の値が過度な上昇を抑制し、端末のパケット破棄を低減させることができると期待される。一方、提案手法におけるチャネルビジー時に BE と NB の値を常に維持する動作は、過剰な送信待機時間延長を招く可能性があり、結果としてパケット送信完了までの遅延(アクセス遅延)の増大が懸念される。そのため、このアクセス遅延の増大を回避するために、BE と NB の値の維持回数に制限を設けることで、過剰な BE と NB 値の維持を防ぐ。BE および NB 値の適切な維持回数を設定することで、端末のパケット破棄を低減しつつアクセス遅延の低減を同時に得ることができる期待される。そこで、本研究ではさらに、提案手法の動作を考慮した理論解析モデルを新たに構築し、適切な維持回数を数理モデルより導出する。本提案手法の動作を実装した計算機シミュレータを実施し、従来手法との性能比較を示すことにより提案手法の有効性を

評価する。また、数理解析に基づく性能評価も示すことにより、提案手法の妥当性を示す。

1.3 論文構成

第2章ではVLCネットワークにおける技術的動向および通信方式について記述する。また、VLCネットワークへの無線全二重通信の適用について記述する。さらに、IEEE 802.11 ネットワークおよび IEEE 802.15.7VLC 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、FD VLC ネットワークにおけるパケット破棄を抑制する改良型バックオフ手法を提案する。第4章では改良型バックオフ手法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5章では計算機シミュレーションと理論解析モデルを用いて得られる結果から、改良型バックオフ手法の有効性について論述する。最後に第6章で本論文を総括する。

第2章

関連研究

本章では2.1節に可視光通信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IEEE 802.11 無線LAN および可視光通信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 VLC ネットワーク

2.1.1 VLC の歴史とその技術動向

VLCとは可視光を変調させることで情報伝送を行う通信のことであり、近年広く普及しつつあるLED照明などが高速に変調することが可能であることから注目されている技術である。VLCが注目されるようになったのは最近であるが、古くから狼煙を用いることで遠くにいる人間が煙を認識することで何かしらの情報を伝送したり、望遠鏡を用いて遠くにある腕木を認識する腕木通信方式などが使われていた[18]。1880年にAlexander Graham Bellが無線光通信を行うためにフォトフォンを開発した[19]。これは、太陽光を鏡で反射させ、その鏡を人間の声の振動で変調させるものだった。しかし、天候や光量不足によりフォトフォンは実用化されなかった。その後、電磁波の存在の発見により、電磁波を用いた通信の研究が盛んに行わ

れるようになった。

人工的に光る光源は、Thomas Alva Edison が 1879 年に実用化に成功した白熱電球が最初で、20 世紀初頭には LED の原理であるエレクトロルミネセンスの現象が確認されたが、1960 年代になって初めて LED やレーザダイオードが発明された [20]。その後、LED 光やレーザ光を空間に飛ばして通信をする光空間通信がしばらく試みられてきたが、1970 年代に光ファイバ通信に重点が置かれてからは、光空間通信の応用はビル間の通信など限定的であった。しかし、1990 年代に白色 LED は発明されて以降、LED 照明の急速な普及によって可視光通信が注目されるようになった [18]。光空間通信を行うためのデバイスとして白熱電球や蛍光灯の使用が多く検討されていたが、これらは一秒間に数回しか点灯、消灯を行うことができず高速な通信には適さないとされていた。しかし、LED の登場により高速な点滅制御が可能となり高速な通信が可能となった。また、消費電力や寿命等の特性も、白熱電球や蛍光灯に比べ優れているため、VLC の研究が盛んに行われている。

屋内における VLC では、天井に取り付けられた LED 照明などと PC やスマートフォンといったデバイスに取り付けられた LED およびフォトダイオードによって通信を行う。送信側は、送信すべき情報を受け取るとそれを光の点滅に変換する。この光の点滅は数百 MHz という非常に高速なものであり、普段我々が使用しているスクリーンのリフレッシュレートの 10000 倍以上の速度であるため、人も目では認識できないため、ちらつきが問題になることはない。受信側は、光の点滅をフォトダイオードによって光強度の変化として検出し情報を受信する。

2.1.2 IEEE 802.15.7

VLCをネットワークとして利用するために、技術標準化機関IEEEにより2011年に短距離光無線通信のための規格IEEE 802.15.7[9]が策定された。この規格では物理層(Physical: PHY)とMAC層を定義している。2.1.2.1節および2.1.2.2節でIEEE 802.15.7のPHY層およびMAC層について記述する。

2.1.2.1 PHY層に関する技術概要

IEEE 802.15.7で想定しているPHY層の Protokolとして、可視光通信の屋内および屋外での使用を想定して3つのモードをサポートしている。PHY Iでは主に屋外におけるアプリケーションを想定し、低データレート(11.67-266.6 kbps)での通信モードをサポートしている。PHY IIは主に屋内利用を想定しており、高データレート(1.25-96 Mbps)での通信モードをサポートしている。PHY IおよびPHY IIのモードではLEDの点滅によって変調するオンオフ変調(On-Off Keying: OOK)と、照明の調光機能を用いる可変パルス位置変調(Variable Pulse Position Modulation: VPPM)を用いている。PHY IIIでは、異なる周波数(色)で動作する複数の光源と検出器を使用するアプリケーション向けのモードである。このモードでは色度座標を用いて情報を伝送するカラーシフトキーイング(Color Shift Keying: CSK)を使用する。

2.1.2.2 MAC層に関する技術概要

MAC層は、他端末からの干渉や複数端末の同時送信による信号衝突を回避するためのチャネルアクセス方式が規定されている。チャネルアクセスには、コーディネータと呼ばれる中央制御装置がビーコンを全端末に対し定期的に送信するスロット型

と、コーディネータがビーコンを送信しない非スロット型の2種類がある。スロット型は、全端末がコーディネータから送信されるビーコンを用いて同期を行う。一方、非スロット型では全端末は同期を行わず、データ生起後すぐに送信を行うことができる。IEEE 802.15.7におけるチャネルアクセスの動作の詳細に関しては、2.1.3.2節にて述べる。

2.1.3 無線ネットワークにおけるチャネルアクセス

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プロトコルが規定されている。無線ネットワークは制御方式によって、集中制御型ネットワークと自律分散型ネットワークに大別される。集中制御型ネットワークは基地局などのネットワーク全体を管理する集中制御局を介して通信を行うネットワークであり、各端末は集中制御局に従いデータの送受信を行う。しかし、ネットワーク内の端末数が多い場合、集中制御局が処理するデータ量が増加するため、各端末に適切にチャネルの割り当てを行うことが困難となる。一方、自律分散型ネットワークは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ができるため、無線LANやセンサネットワーク、アドホックネットワークなどの端末数が多いネットワークで使用される。

自律分散型ネットワークでは、チャネルアクセス方式としてCSMA/CA方式が採用されている。CSMA/CA方式は各端末が自律的にチャネルの使用状況を検知する通信である。このCSMA/CA方式はIEEE 802.11無線LAN[21]やIEEE 802.15.4無線センサネットワーク[22]、IEEE 802.15.7 VLCネットワーク[9]などで用いられている。2.1.3.1節に無線ネットワークにおいて基本のチャネルアクセス方式であるCSMA/CA方式を採用したIEEE 802.11 DCF(Distributed Coordination Function)

の動作を記述する。また、2.1.3.2節にIEEE 802.15.4無線センサネットワークおよびIEEE 802.15.7 VLC ネットワークにおけるCSMA/CA方式の動作について記述する。

2.1.3.1 IEEE 802.11 DCF

図 2.1 に、IEEE 802.11 DCF におけるチャネルアクセス例を示す。DCF では、送信端末はデータ送信をする前にキャリアセンスによりチャネルの状態を調べる。DIFS(DCF Inter Frame Space)の間チャネルが未使用(アイドル状態)であれば送信を開始する。キャリアセンスの際、チャネルが使用中(ビジー状態)の場合チャネルがアイドルになるまで待機する。再びアイドルになった後、DIFSの間アイドル状態が続いた場合、バックオフに入る。バックオフとは端末ごとに設定されるランダムな時間待機することであり、複数端末が同時に送信することによる衝突を回避するために用いられる。バックオフによる待機時間は、 $[0, CW)$ の範囲からランダムに選択させる。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る。チャネルがアイドルであればバックオフタイマのカウントを減らす。チャネルがビジーであればアイドルになるまでカウントを止め、チャネルがアイドルになり次第再びタイマを減らしていく。バックオフタイマが0になると端末はデータの送信を開始する。受信端末はデータの受信に成功した後、SIFS(Short Inter Frame Space)期間待機し、ACK(ACKnowledgement)フレームを送信端末へ送信する。送信端末はデータ受信後にACKフレームが返信されたことを確認することでデータ送信に成功したと判断する。ACKフレームが返信されなかった場合、送信失敗と判断し再送を行う。再送の際、データの衝突を回避するため指数バックオフ動作によって送信の待機時間を決定する。このとき、BEとNBの値を1増加させる。NB値が規定された基準値

である $macMaxCSMABackoffs$ 以下の場合、端末は待機時間の再設定を行う。このとき、他に送信を行っている端末や送信を待機している端末が多いと考えられるため、それらの端末との競合を回避するために CW 値を 2 倍に設定し、 $[0, 2 \times CW)$ の範囲からランダムにバックオフタイムを選択する。従って i 回目の再送時の CW の値は

$$CW_i = 2^{\min(macMinBE+i, macMaxBE)} \quad (2.1)$$

となる。ここで、 $macMinBE$ 、 $macMaxBE$ はそれぞれ BE 値の最小値、最大値である。NB 値が $macMaxCSMABackoffs$ を超えた場合、データを破棄する。

この CSMA/CA 方式を採用した IEEE 802.11 DCF の動作は IEEE 802.15.4 センサネットワーク [22] や、IEEE 802.15.7 VLC ネットワーク [9] などの無線ネットワークにおいて基本となるチャネルアクセス方式である。

2.1.3.2 IEEE 802.15.4 および IEEE 802.15.7 における CSMA/CA 方式

IEEE 802.15.4[22] は IEEE 802.11 無線 LAN よりも範囲の狭いネットワークである無線センサネットワーク向けの規格である。IEEE 802.15.4 は通信速度が遅く、通信距離も短い、低消費電力という特徴がある。

IEEE 802.15.4 におけるチャネルアクセス方式では、消費電力の低減のためにバックオフタイムが 0 になったときのみチャネル状態を確認する CCA(Clear Channel Assessment) を行う。つまり、IEEE 802.15.4 では他端末が送信中であってもバックオフタイムは減少し続ける。タイムが 0 となり CCA を行った結果、チャネルがアイドルであれば送信を行い、チャネルがビジーであれば、他端末による送信が行われていると判断し送信を控えることで衝突を回避する。

図 2.2 に IEEE 802.15.4 におけるチャネルアクセス例を示す。端末はデータ送信前

に CW 値の範囲からランダムなバックオフタイムを選択し、0 になるまでタイムを減少させる。タイムが 0 になった場合、チャンネル状態を確認する CCA を行い、チャンネルがアイドルと判定されると端末はデータの送信を開始する。データ送信後、ACK フレームが受信端末から返信されなかった場合、データ衝突が発生したと判断し再送を行う。この際、BE と NB の値を増加させ、2 倍となった CW 値の範囲からランダムなバックオフタイムの再設定を行う。また、CCA 時にチャンネルビジーと判定された場合もデータ衝突時と同様に BE と NB の値を増加させ、2 倍となった CW 値の範囲からランダムなバックオフタイムの再設定を行う。つまり、IEEE 802.15.4 では複数端末が同じバックオフタイムを選択したことによる衝突時と、CCA 時にチャンネルビジーと判定されたときに BE と NB の値を増加させる。

IEEE 802.15.7 VLC ネットワークは、IEEE 802.15.4 の規格を参考に行っているため、チャンネルアクセス方式として同様の CSMA/CA 方式を採用している。

2.1.4 VLC ネットワークにおける隠れ端末問題

CSMA/CA 方式を用いた無線通信では隠れ端末による衝突が問題となる。無線通信では端末の距離や障害物の影響によってお互いの送信信号を受信できない環境が起り得る。このような関係にある端末を互いに隠れ端末と呼ぶ。図 2.3 では、端末 1 と端末 2 が遠距離に配置されていると仮定する。このとき、互いの通信状況を把握できず、隠れ端末の関係となる。そのため、端末 1 が AP (Access Point) へ信号を送信しているにもかかわらず、端末 2 も AP へ送信を行い AP で信号の衝突が発生する。このような隠れ端末が存在するとチャンネル状態を確認するキャリアセンスが有効に機能せず衝突が増加し、スループット低下の要因となる。

一方、VLC ネットワークでは可視光の高い指向性により隠れ端末問題が電波通信

に比べより深刻となる [10]-[12]. 図 2.4 に VLC ネットワークにおける隠れ端末問題の発生原因を示す. 図 2.4 では, 例としてコーディネータは天井に設置されており, 2 台の端末は近距離に配置されているとする. 端末 1 がコーディネータに向け信号を送信する場合, その送信信号は可視光の指向性によってコーディネータが設置されている垂直方向にしか伝搬しない. そのため, 水平方向に配置された端末 2 は端末 1 の送信信号を検知できず, 端末 1 の送信中に送信を開始してしまい, コーディネータにおいて信号の衝突が発生してしまう. このように, VLC ネットワークでは可視光の指向性により近隣端末であっても通信を検出できず, 隠れ端末による衝突が頻繁に発生し, ネットワーク性能が著しく低下してしまう.

また, 2.1.3.2 節で述べた IEEE 802.15.7 のチャンネルアクセス方式も, このような VLC ネットワークの特徴を考慮できていないため, 隠れ端末による衝突を促進させる要因となっていると言える. その理由として, IEEE 802.15.7 における CSMA/CA 方式では, CCA を行うのは自身のフレーム送信のバックオフタイムが 0 になったときのみであり, 他端末の送信が行われてチャンネルがビジーであってもバックオフタイムは減少し続ける. 最初に送信権を獲得して送信を開始した端末は信号の送信に成功するが, 他端末は CCA をしたとしても, 高トラヒック環境下ではすでに送信が行われている確率が高く, IEEE 802.15.7 のバックオフ動作に従いバックオフタイムの減少およびタイム値の再設定を繰り返し行う. 最終的に, 送信権が得られなかった端末のデータパケットが頻繁に破棄される. また, 可視光の指向性によって隠れ端末の関係にあるとき, キャリアセンスが有効に機能せず, CCA 時に常にチャンネルアイドルと判定され, 信号を送信してしまう. その結果, 以前に送信していた信号とも衝突してしまい, ネットワーク性能が著しく低下してしまう.

このように, VLC ネットワークでは可視光の持つ指向性により隠れ端末問題が深刻となる. また, IEEE 802.15.7 のチャンネルアクセス方式も相まってネットワーク性

能の劣化を引き起こす。

2.2 VLC ネットワークへの無線全二重通信の適用

VLC ネットワークでは、可視光の持つ指向性によって隠れ端末問題が深刻となっていた。そのため、隠れ端末問題を解決するために無線全二重通信を VLC ネットワークの適用した FD VLC ネットワークの研究が注目されている [12], [14]-[17]。無線全二重通信とは同一周波数上で送受信を同時に行うことができる技術である [13]。2.2.1 節に VLC ネットワークへの無線全二重通信の実装について電波を用いた通信と比較して記述する。2.2.2 節に FD VLC ネットワークにおいて隠れ端末問題を回避するメカニズムについて記述する。2.2.3 節に FD VLC ネットワークにおける隠れ端末問題を回避した MAC プロトコルについて記述する。最後に、2.2.4 節に本研究が着目する問題である FD VLC ネットワークにおいてパケット破棄が頻繁に発生する原因について記述する。

2.2.1 無線通信への無線全二重通信の実装

これまでの無線通信では同一周波数上で送信と受信を同時に行うことができず、送信と受信を交互に行う半二重通信が一般的だった。しかし、近年、同一周波数上で送受信を同時に行うことができる無線全二重通信が注目されている。同一周波数上で無線全二重通信を行うためには、受信信号から所望信号のみを取り出す必要がある。このとき受信信号には、所望信号のほかに端末自信が送信する信号(自己干渉信号)が含まれる。一般的に端末の送信電力は所望受信信号電力の約 160 億倍である。そのため、約 110dBm もの自己干渉信号除去を行わなければならない [13]。そのた

めアナログ，デジタル回路を用いなければ自己干渉除去を行うことができず，無線全二重通信を行うことができない [23]。一方，可視光の反射光は直接光に比べ，受信信号電力が十分に小さい [24]。そのため，VLC ネットワークでは自己干渉信号による影響を無視できる。また，VLC ネットワークでは，一般的に送信機としてLEDを用い，受信機としてフォトダイオードを用いて通信を行う。つまり，端末およびコーディネータの送信回路と受信回路に別々の部品を使用しているため，信号の送受信を同時に容易に行うことができる。これらの理由から，VLC ネットワークは電波を用いた通信に比べ無線全二重通信の適用が容易である。

2.2.2 FD VLC ネットワークにおける隠れ端末問題の解消方法

2.1.4 節で述べたように，VLC ネットワークにおけるパケット破棄は可視光信号の指向性により他端末の送信信号を近隣端末であっても検知することができないことに起因する。その結果として端末は他端末の送信中であってもデータパケットの送信を行うため衝突が発生し，データパケットの破棄が深刻となる。そこで，VLC ネットワークに無線全二重通信を適用したFD VLC ネットワークによって隠れ端末問題を回避する研究が行われている [12], [14], [15]。図 2.5 にFD VLC ネットワークにおける隠れ端末問題を回避するネットワーク例を示す。図 2.5 では，例として天井に配置されているコーディネータと2台の端末の情報通信を想定し，端末1がコーディネータに信号を送信しているとする。コーディネータは端末1からの信号を受信しながら全端末に向け情報を含まないビジートン信号を送信する。このビジートン信号によって端末2は隠れ端末の関係にあっても，他端末が送信中であることを間接的に検知できる。したがって，VLC ネットワークにおいて無線全二重通信によるビジートン信号を用いることで隠れ端末によるパケット衝突を回避するこ

とができる。

2.2.3 FD VLC ネットワークにおける MAC プロトコル

無線全二重通信を VLC ネットワークに適用することで隠れ端末問題を回避することができるため、FD VLC ネットワークのための MAC プロトコルの提案が盛んに行われている [12]-[15]。文献 [12] では、VLC ネットワークにおける隠れ端末問題による影響の調査をし、ビジートン信号を用いることによってネットワーク性能の向上を行っている。文献 [14] では、隠れ端末問題を解消するために U-ALOHA (Uplink-ALOHA) と FD-CSMA の 2 つのプロトコルを提案した。この文献ではダウンリンク通信をアップリンク通信のためのビジートン信号として扱うことで隠れ端末による衝突を回避している。しかし、複数端末が同時にデータパケットを送信することによるパケット破棄によってネットワーク性能が低下してしまう。

このような、データパケットの同時送信によって発生する無駄な時間リソースの浪費を低減するために、文献 [15] では FD-RTS/CTS (Full Duplex-Request To Send/Clear To Send) 方式を提案している。この方式では制御フレームである RTS フレームと CTS フレームをデータパケット送信前に交換することによって、衝突時に発生するオーバーヘッドを軽減することができる。図 2.6 に FD-RTS/CTS 方式の動作を考慮したチャネルアクセス例を示す。図 2.6 では、例としてコーディネータと 2 台の端末の動作に着目する。図 2.6(a) 時点において端末 1 が CCA を行ったとする。その際、コーディネータからのビジートン信号を検知しなかったためチャネルがアイドル状態であると判定される。そのため、(b) 時点に示すように端末 1 は CCA 終了後に RTS フレームをコーディネータに向けて送信する。コーディネータは端末 1 からの RTS フレームを受信すると同時に無線全二重通信を用いてビジートン信号を全端

末に向けて送信する。端末2は(b)時点においてCCAを行ったとき、コーディネータからのビジートーンを検知するためチャンネルビジーであると判定される。その後、RTSフレームの衝突を回避するために自身のBEとNBの値を増加させCW値を2倍にし再度ランダムなバックオフタイムを選択する。この動作によって、隠れ端末によるパケット破棄を回避することができる。

2.2.4 FD VLC ネットワークにおける問題点

2.2.2節および2.2.3節で述べたように、FD VLC ネットワークによって深刻な隠れ端末問題を回避することができるが、副作用としてチャンネルビジー判定によるパケット破棄が頻繁に発生する。これは、CCA時にチャンネルビジーと判定された場合の動作に起因する。図2.6(b), (c), (d)時点において、端末2はCCA時にコーディネータからのビジートーン信号によってチャンネルビジーと判定させる。その時に、端末2はBEとNBの値を増加させ続ける。その結果、(d)時点において端末2のNB値が基準値である $macMaxCSMABackoffs$ に達し、データパケットが破棄されてしまう。FD VLC ネットワークでは、ビジートーン信号を用いたことによってフレームの衝突よりもCCAによるチャンネルをビジーと判定する機会が多くなってしまう。つまり、フレーム衝突を回避するためにビジートーン信号を用いていたが、そのビジートーン信号によるチャンネルビジー時の動作によってパケット破棄が深刻な問題となる。

2.3 数理モデルに基づくネットワークシステムの性能解析

システムの動作を数理モデルに表現したうえで、その性能を評価する研究がこれまで多くなされている [15], [25]-[34]. 数理モデルを構築する利点として、システムの動作を数式として表現されるため、その動作とシステムの振舞いの直感的な理解ができることや、システムの性能を計算機シミュレーションと比べて高速かつ低コストで把握できるということがあげられる. 本節では、無線 LAN などの自律分散型ネットワークにおける数理モデルに基づく性能解析の技術概要についてまとめる. 2.3.1 節では無線 LAN の数理解析の基本的かつ草分け的な解析手法となった「マルコフ連鎖モデルを用いた IEEE 802.11 DCF における性能解析手法 [25]」について関連および発展研究も踏まえてまとめる. そのうえで、2.3.2 節では、IEEE 802.15.7 ネットワークの性能解析手法を紹介し、従来研究である FD-RTS/CTS 方式における理論解析手法について記述する.

2.3.1 IEEE 802.11 ネットワークにおける理論解析

2.3.1.1 飽和ネットワークにおける理論解析

文献 [25] では、マルコフ連鎖モデルを用いて IEEE 802.11 ネットワークにおける CSMA/CA の動作を理論的に表現している. マルコフ連鎖とは、未来の挙動は現在の値でのみ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をいう. この理論解析モデルでは、1 台のアクセスポイントと n 台の端末で構成されるネットワークにおいてアップリンクにおける最大スループットを理論的に導出している. 解析の仮定としてネットワーク内の各

端末はすべての他端末の送信を検知可能である (隠れ端末なし) とし, すべての端末が送信バッファ内に常にフレームを保持している飽和状態であるとする.

文献 [25] の理論解析では, 任意の端末における CSMA/CA の動作をバックオフステージ (再送回数) とそのステージにおけるタイマ値 (バックオフタイマ) の2つのパラメータで表された状態で定義し, その状態の遷移をマルコフ連鎖を用いて表すことで CSMA/CA の動作のモデル化を可能にした. 図 2.7 に示すマルコフ連鎖モデルにおける各状態 (i, k) は, それぞれ端末のバックオフステージおよびバックオフタイマの値を表している. また図 2.7 において γ は各端末の衝突率であり

$$\gamma = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (2.2)$$

と表せる. ただし, τ は各端末の送信確率を示し, W_i はバックオフステージ i における CW 値である. 図 2.7 に示すマルコフ連鎖モデルにおける各状態 (i, k) は, それぞれ端末のバックオフステージおよびバックオフタイマの値を表している. マルコフ連鎖モデルから任意の状態 (i, k) における定常状態確率を $b_{(i,k)}$ を導出することで送信確率 τ は衝突率 γ の関数で表すことができ

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{(i,0)} = \sum_{i=0}^m \gamma_i b_{(0,0)} = \frac{2(1-2\gamma)(1-\gamma)}{W [1 - (2\gamma)^{m+1}] (1-\gamma) + (1-2\gamma)(1-\gamma^{m+1})} \quad (2.3)$$

となる. 式 (2.2), (2.3) から2つの未知数の代数方程式を解くことで任意の端末台数 n に対する衝突率と送信確率が得られる. ネットワークスループットを S と定義すると, バックオフタイマの1状態に滞在する時間の期待値に対するその期間において送信に成功する情報量の期待値の比で算出され

$$S = \frac{E[\text{payload information transmitted in a slot time}]}{E[\text{length of a slot time}]} \quad (2.4)$$

で表せる. ここで $E[\cdot]$ は期待値を表す. ネットワークにおいて少なくとも1台の端

末が送信している確率を P_{tr} とすると

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (2.5)$$

と表せる. また, ネットワークにおいて1台の端末が送信している確率を P_s とすると

$$P_s = \frac{n\tau(1 - \tau)^{n-1}}{P_{tr}} \quad (2.6)$$

と表せる. したがって, ネットワークスループット S は

$$S = \frac{P_s P_{tr} E[P]}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr} P_s T_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c} \quad (2.7)$$

と表せる. ここで, ここで T_s はフレーム送信成功におけるチャンネル使用期間, T_c はフレーム衝突発生時におけるチャンネル使用期間を示す. 式(2.7)より, ネットワークスループットは γ と τ の関数で表すことができる.

このようにマルコフ連鎖モデルを解くことで理論的な IEEE 802.11 ネットワークのスループットが導出可能となる. この文献[25]で提案されている手法は IEEE 802.11 ネットワーク [26], [27] や IEEE 802.15.4 センサネットワーク [28]-[29], IEEE 802.15.7 VLC ネットワーク [31]-[34] の解析において基本となる理論解析モデルである.

2.3.1.2 非飽和ネットワークにおける理論解析

文献 [26], [27] では, IEEE 802.11 ネットワークにおける非飽和状態における理論解析手法の提案がなされている. 文献 [27] では, 待ち行列理論を用いることで IEEE 802.11 ネットワークでの非飽和状態における各端末のフレーム保持確率を導出し, 送信確率を求めている. ここで, フレーム保持確率は送信バッファ内に少なくとも1つ以上のフレームを保持している確率のことである. いま, 送信フレームの平均処理時間 Y_c 以内に少なくとも1つのフレームが送信バッファ内に到着すると想定す

る。送信バッファが無限長であると仮定すると待ち行列モデルは M/M/1/∞ モデルとなり、送信バッファ内に少なくとも1つ以上のフレームがある定常状態確率は

$$\rho = \lambda Y_c \quad (2.8)$$

で表せる。ここで、 λ はフレーム到着率であり

$$\lambda = \frac{O}{P} \quad (2.9)$$

である。ここで、 O はネットワークのトラヒック負荷、 P はペイロードサイズを示す。端末がフレーム送信を終えるまでの平均バックオフ回数を $X(\gamma)$ とすると、 Y_c は $X(\gamma)$ とバックオフタイマを1つ減少させる際にかかる平均経過時間 $E[slot]$ の積で表せるので

$$Y_c = X(\gamma)E[slot] \quad (2.10)$$

となる。ここで、 $E[slot]$ は式 (2.7) の分母と同様に

$$E[slot] = (1 - P_{tr})\sigma + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c \quad (2.11)$$

と表せる。また、 $X(\gamma)$ は式 (2.2) の衝突率 γ を用いて

$$X(\gamma) = \sum_{i=0}^K \gamma^i b_i \quad (2.12)$$

と表せる。ここで、 K は最大再送回数、 $b_0 = CW_0/2$ 、 $b_i = b^i b_0$ for $1 \leq i \leq m - 1$ 、 $b_i = b^m b_0$ for $m \leq i \leq K$ であり、 CW_0 は最小 CW 値、 CW_{\max} ($CW_{\max} = 2^m CW_0$) は最大 CW 値、 m は最大再送回数、 b^i は指数バックオフの乗数を表す。これらから、フレーム保持確率 p_a は

$$p_a = \min(1, \rho) \quad (2.13)$$

と表せる。また、非飽和状態における送信確率 β は式 (2.3) および (2.14) より

$$\beta = \min(1, \rho)\tau \quad (2.14)$$

と表せる. 以上から, 非飽和状態におけるフレーム保持確率と送信確率を得ることができる.

2.3.2 IEEE 802.15.7 における理論解析

2.3.2.1 IEEE 802.15.7 の動作を考慮した理論解析

文献 [30] では, マルコフ連鎖モデルを用いて IEEE 802.15.7 VLC ネットワークにおける CSMA/CA の動作を理論的に表現している. これは文献 [25] の IEEE 802.11 ネットワークのマルコフ連鎖モデルを拡張することによって理論解析モデルを構築している. 図 2.8 に IEEE 802.15.7 VLC ネットワークの動作を考慮した 2 次元マルコフ連鎖モデルを示す. IEEE 802.11 DCF ではバックオフタイムが 0 になったときに送信していたが, IEEE 802.15.7 ではタイムが 0 かつ CCA の結果チャネルアイドルと判定された場合に送信を行う. そのため, 図 2.8 のマルコフ連鎖モデルでは新たにチャネルビジー率 α を考慮している. また, チャネルビジーと判定される期間を導出するために, バックオフタイムの遷移だけでなくデータ送信時の遷移と ACK フレーム送信時の遷移も考慮している. CCA の結果チャネルアイドルと判定された場合, データの送信を行い, チャネルビジー判定された場合は BE と NB の値を増加し再度バックオフタイムの選択を行う. そのため, 図 2.8 における各状態を (i, k) とすると, CCA の動作に関する状態遷移確率は

$$\begin{cases} P\{(i+m+1, 0)|(i, 0)\} = 1 - \alpha & i \in (0, m), \\ P\{(i+1, k)|(i, 0)\} = \frac{\alpha}{W_{i+1}} & k \in (0, W_{i+1} - 1) \quad i \in (0, m-1), \\ P\{(0, k)|(m, 0)\} = \frac{\alpha}{W_0} & k \in (0, W_0 - 1), \end{cases} \quad (2.15)$$

で表せる。この状態遷移確率を用いることにより、IEEE 802.15.7におけるCCA確率と衝突率を得ることができ、IEEE 802.15.7の動作を考慮した解析を行うことができる。

2.3.2.2 FD-RTS/CTS方式の動作を考慮した理論解析

文献 [15] では、FD-RTS/CTS方式の動作をマルコフ連鎖モデルを用いることで理論的に表現している。これは文献 [30] のIEEE 802.15.7ネットワークのマルコフ連鎖モデルを拡張することによって理論解析モデルを構築している。図 2.9 にFD-RTS/CTS方式の動作を考慮した2次元マルコフ連鎖モデルを示す。図 2.9では、チャネルビジーと判定される期間を導出するために、バックオフタイマの遷移だけでなくRTSフレーム送信時の遷移とデータパケット送信時の遷移も考慮している。図 2.9のマルコフ連鎖モデルはFD-RTS/CTS方式におけるバックオフタイマの状態遷移、衝突および送信成功時の状態遷移を示しており、これを解くことによってFD-RTS/CTS方式の動作を考慮した解析を行うことができる。この理論解析モデルでは、1台のコーディネータと N 台の端末が存在するネットワークを想定しており、全ての端末の送信バッファには常に送信フレームが存在する飽和状態を仮定している。また、全ての端末は他端末の通信をキャリアセンスできない隠れ端末であると仮定している。しかし、ビジートーン信号を用いることで他端末が送信中であることを間接的に検知できるとする。

図 2.9における各状態 (i, k) は、それぞれ端末のバックオフステージおよびバックオフタイマの値を示している。また図 2.9において α および p_c はそれぞれ各端末のチャネルビジー率と衝突率を示している。また m は最大再送回数を示し、 W_i は再

送回数 i に帯する CW 値であり

$$W_i = 2^{\min(\text{macMinBE}+i, \text{macMaxBE})} \quad (2.16)$$

で表せる。ここで、 macMinBE と macMaxBE はそれぞれバックオフ指数の最小値と最大値を示す。図 2.9 のマルコフ連鎖モデルは FD-RTS/CTS 方式におけるバックオフタイムの選択およびカウント、RTS フレームと CTS フレームの交換、そしてデータパケットの送信に至るまでの状態を示している。状態 (i, k) において、端末は $i \in (0, m)$, $k \in (0, W_i - 1)$ のときに「バックオフ期間」であり、 $i \in (0, m)$, $k \in \{RTS, SIFS_1, CTS, SIFA_2\}$ のときに「RTS/CTS 期間」であり、 $i = -1$, $k \in (1, B)$ のときに「送信期間」と定義する。ここで、 B はデータパケットの送信にかかる時間を示し、

$$B = T_{\text{DATA}} + T_{\text{SIFS}} + T_{\text{ACK}} + T_{\text{LIFS}} \quad (2.17)$$

で表せる。ただし、 T_{SIFS} と T_{LIFS} はそれぞれ SIFS 期間と LIFS 期間にかかる時間を示し、 T_{DATA} と T_{ACK} はそれぞれデータパケットと ACK フレームの送信にかかる時間を示す。図 2.9 において、バックオフ期間における状態遷移確率は

$$\left\{ \begin{array}{ll} P\{(i, k)|(i, k+1)\} = 1 & k \in (0, W_i - 2) \quad i \in (0, m), \\ P\{(i, RTS)|(i, 0)\} = 1 - \alpha & i \in (0, m), \\ P\{(0, k)|(m, 0)\} = \frac{\alpha}{W_0} & k \in (0, W_0 - 1), \\ P\{(0, k)|(m, SIFS_2)\} = \frac{p_c}{W_0} & k \in (0, W_0 - 1), \\ P\{(0, k)|(-1, B)\} = \frac{1}{W_0} & k \in (0, W_0 - 1), \\ P\{(i, k)|(i-1, 0)\} = \frac{\alpha}{W_i} & k \in (0, W_i - 1) \quad i \in (1, m), \\ P\{(i, k)|(i-1, SIFS_2)\} = \frac{p_c}{W_i} & k \in (0, W_i - 1) \quad i \in (1, m) \end{array} \right. \quad (2.18)$$

で表せる。また、RTS/CTS 期間における遷移確率は

$$\begin{cases} P\{(i, SIFS_1)|(i, RTS)\} = 1 & i \in (0, m), \\ P\{(i, CTS)|(i, SIFS_1)\} = 1 & i \in (0, m), \\ P\{(i, SIFS_2)|(i, CTS)\} = 1 & i \in (0, m), \\ P\{(i, k)|(i-1, SIFS_2)\} = \frac{p_c}{W_i} & k \in (0, W_i - 1) \quad i \in (1, m), \\ P\{(-1, 1)|(i, SIFS_2)\} = 1 - p_c & i \in (0, m) \end{cases} \quad (2.19)$$

で表せる。また、送信期間に関する遷移確率は

$$P\{(-1, k+1)|(-1, k)\} = 1 \quad k \in (1, B-1) \quad (2.20)$$

で表せる。任意の状態 (i, k) における定常状態確率を $b_{(i,k)} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\}$, $i \in (0, m)$, $k \in (0, W_i - 1)$ とすると、式 (2.18) より、 $b_{(i,0)}$ は

$$b_{(i-1,0)} \cdot [\alpha + p_c(1 - \alpha)] = b_{(i,0)} \quad \rightarrow \quad b_{(i,0)} = y^i b_{(0,0)} \quad (2.21)$$

と表せる。ここで y はバックオフステージが増加する確率であり

$$y = \alpha + (1 - \alpha)p_c \quad (2.22)$$

で表せる。また、式 (2.18) より $b_{(i,k)}$ は

$$b_{(i,k)} = \frac{W_i - k}{W_i} \begin{cases} (1 - \alpha)(1 - p_c) \sum_{i=0}^{m-1} b_{(i,0)} + y \cdot b_{(m,0)} & i = 0 \\ y \cdot b_{(i-1,0)} & 0 < j \leq m \end{cases} \quad (2.23)$$

と表せる。マルコフ連鎖モデルにおける全ての定常状態確率の和は1となるので

$$\begin{aligned} 1 &= \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{(i,k)} + \sum_{i=0}^m b_{(i,RTS)} + \sum_{i=0}^m \sum_{j=1}^2 b_{(i,SIFS_j)} + \sum_{i=0}^m b_{(i,CTS)} + B \cdot b_{-1,1} \\ &= b_{(0,0)} \left(\sum_{i=0}^m \frac{W_i - 1}{2} y^i + A(1 - \alpha) \frac{1 - y^{m+1}}{1 - y} + B(1 - \alpha)(1 - p_c) \frac{1 - y^{m+1}}{1 - y} \right) \end{aligned} \quad (2.24)$$

と表せる. ここで A および B はそれぞれ RTS/CTS 期間と送信期間のチャンネル使用時間であるので

$$A = T_{\text{RTS}} + T_{\text{SIFS}} + T_{\text{CTS}} + T_{\text{SIFS}} \quad (2.25)$$

$$B = T_{\text{DATA}} + T_{\text{SIFS}} + T_{\text{ACK}} + T_{\text{LIFS}} \quad (2.26)$$

となる. ただし, T_{RTS} と T_{CTS} はそれぞれ RTS フレームと CTS フレームの送信にかかる時間を示す. また, T_{SIFS} と T_{LIFS} はそれぞれ SIFS 期間と LIFS 期間にかかる時間を示し, T_{DATA} と T_{ACK} はそれぞれデータパケットと ACK フレームの送信にかかる時間を示す. したがって, 式 (2.24) より

$$\frac{1}{b_{(0,0)}} = \sum_{i=0}^m \frac{W_i - 1}{2} y^i + A(1 - \alpha) \frac{1 - y^{m+1}}{1 - y} + B(1 - \alpha)(1 - p_c) \frac{1 - y^{m+1}}{1 - y} \quad (2.27)$$

と表せる. FD-RTS/CTS 方式では仮定より, 2 台以上の端末が同時送信したときのみ RTS フレームの衝突が発生する. つまり, 衝突率 p_c はある端末がバックオフタイマを 0 にしたときに少なくとも 1 台以上が同時にタイマを 0 にする確率であるので

$$p_c = 1 - (1 - \varphi)^{N-1} \quad (2.28)$$

で表せる. ただし, φ は CCA 確率である. FD-RTS/CTS 方式では, 端末のバックオフタイマが 0 になったときに CCA を行うので, CCA 確率 φ は図 2.9 における定常状態確率 $b_{(i,0)}$ の和で与えられる. したがって

$$\varphi = \sum_{i=0}^m b_{(i,0)} = \frac{1 - y^{m+1}}{1 - y} b_{(0,0)} \quad (2.29)$$

で表せる. チャンネルビジー率 α は端末が CCA を行った際にコーディネータからビジートーン信号を受信する確率である. したがって, チャンネルビジー率は

$$\alpha = [A + B(1 - p_c)][1 - (1 - \varphi)^{N-1}](1 - \alpha) \quad (2.30)$$

で表せる. 式 (2.28), (2.29), (2.30) から 3 つの未知数の代数方程式を解くことで衝突率, CCA 確率, チャンネルビジー率を得ることができる.

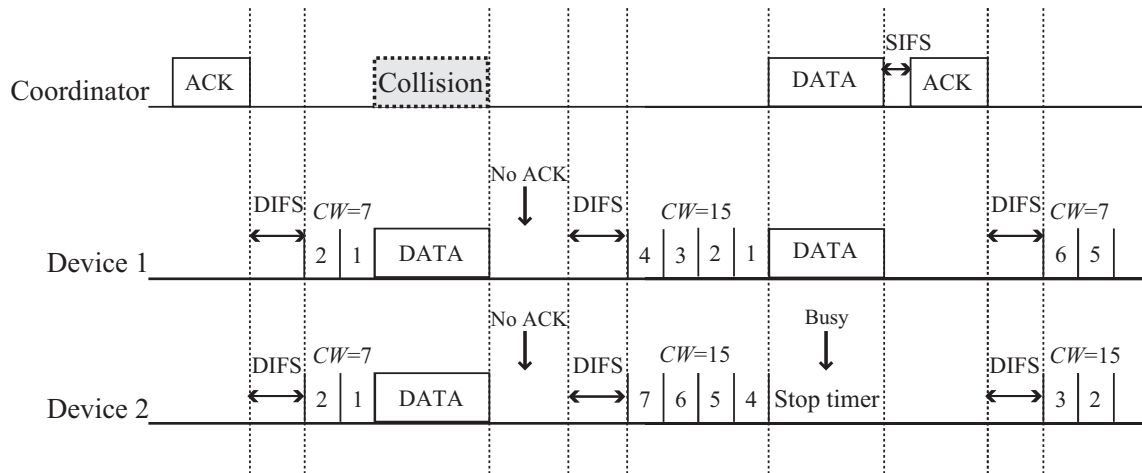


図 2.1: IEEE 802.11 DCF におけるチャネルアクセス例

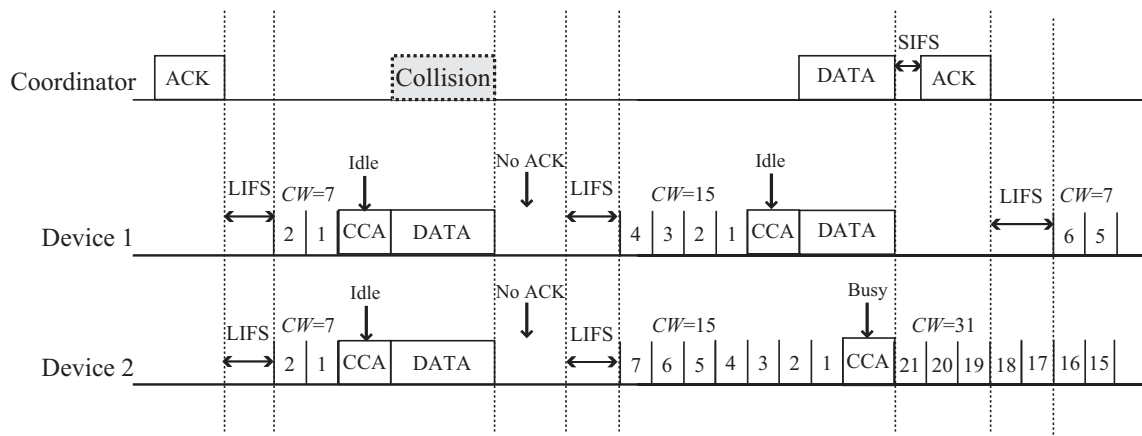


図 2.2: IEEE 802.15.4 および IEEE 802.15.7 におけるチャンネルアクセス例

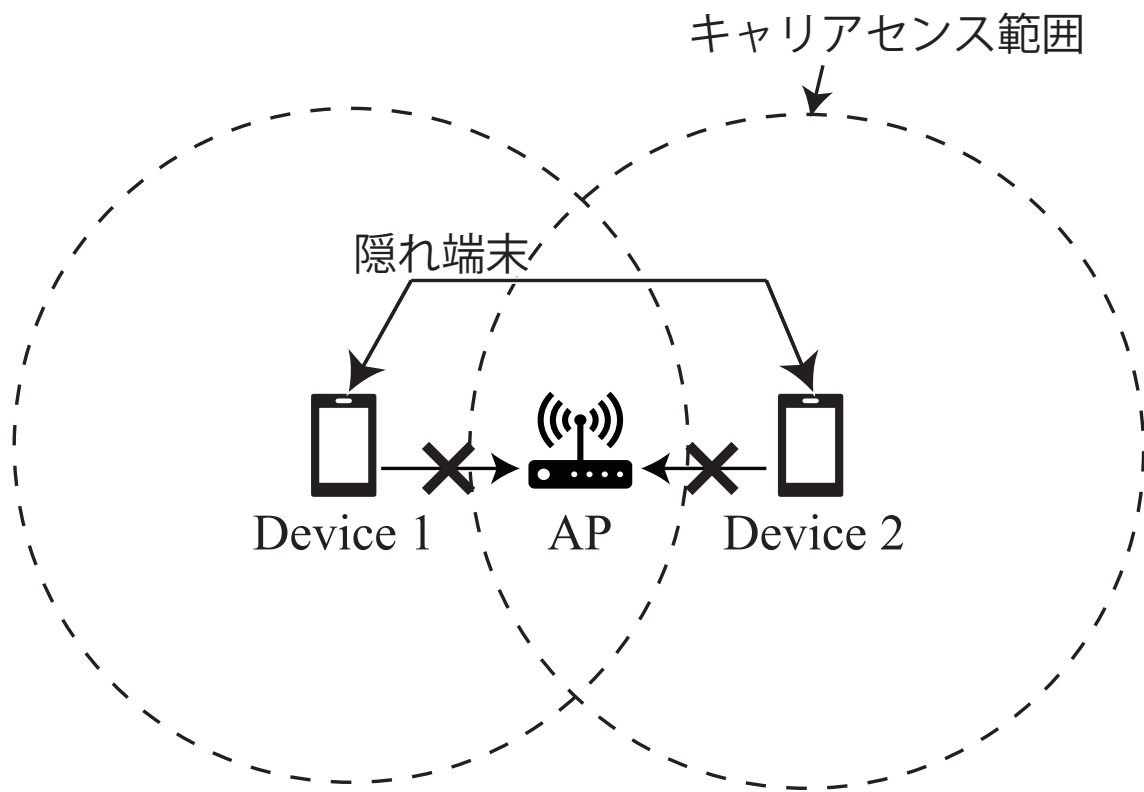


図 2.3: 無線通信における隠れ端末問題

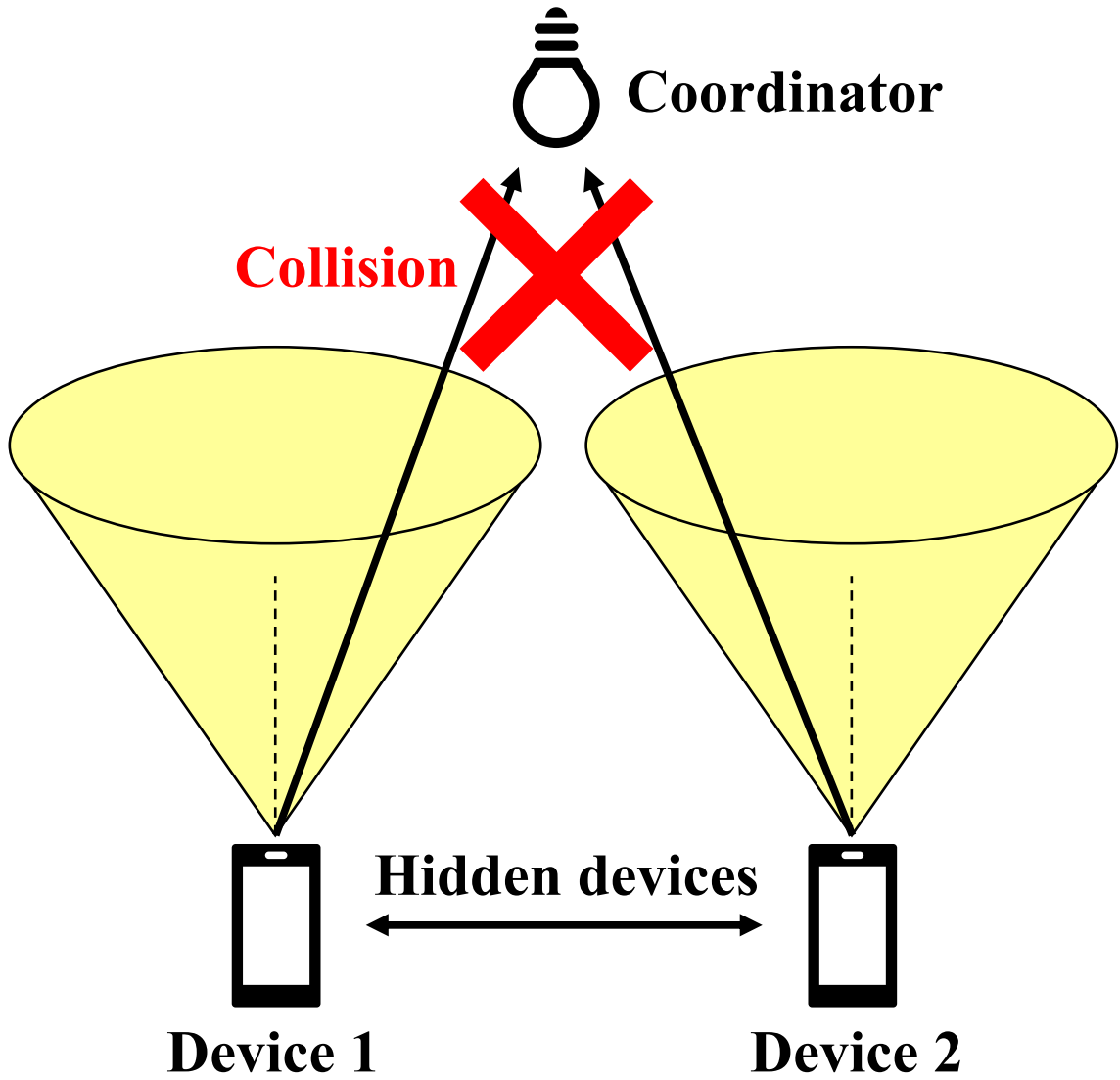


図 2.4: VLC ネットワークにおける隠れ端末問題

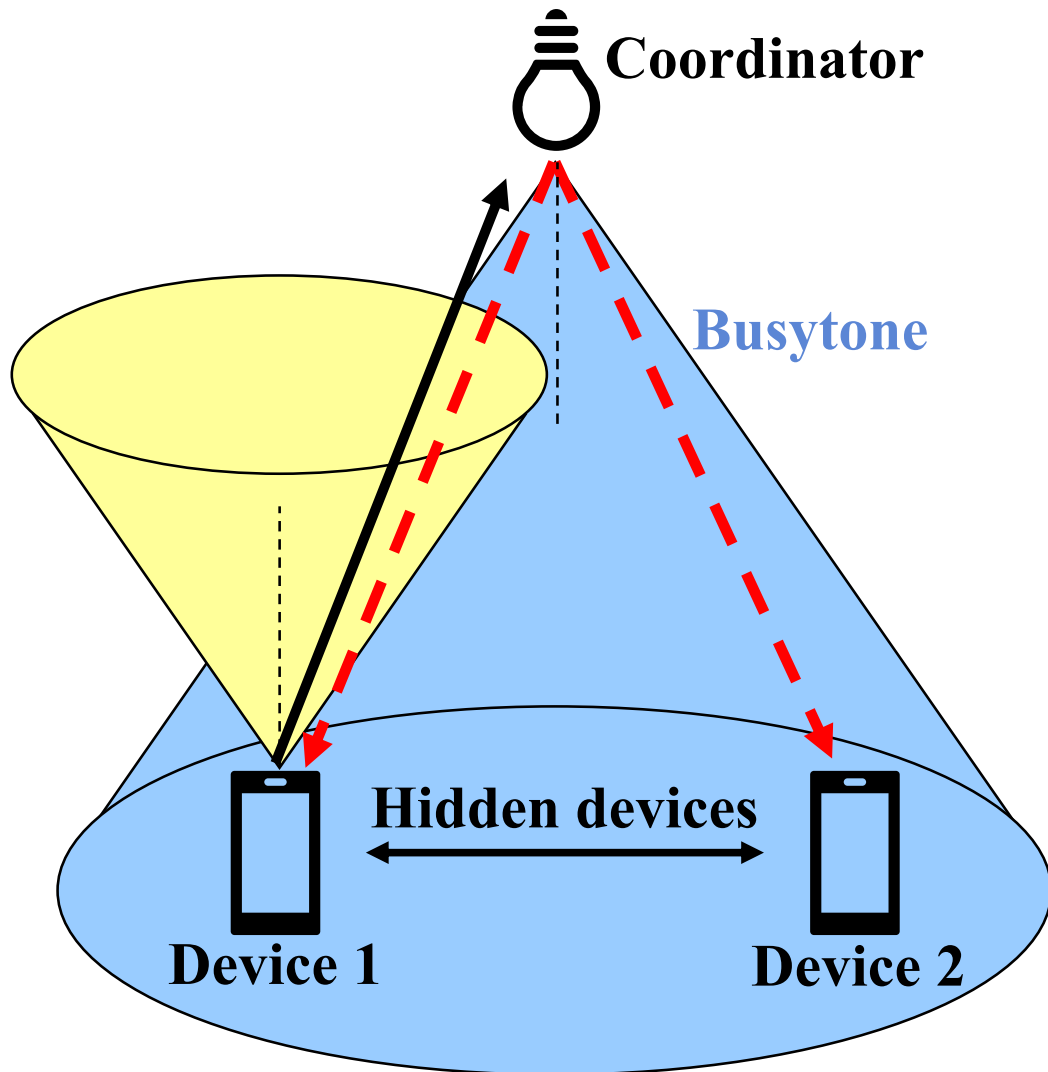


図 2.5: FD VLC ネットワークにおける隠れ端末問題を回避するネットワーク例

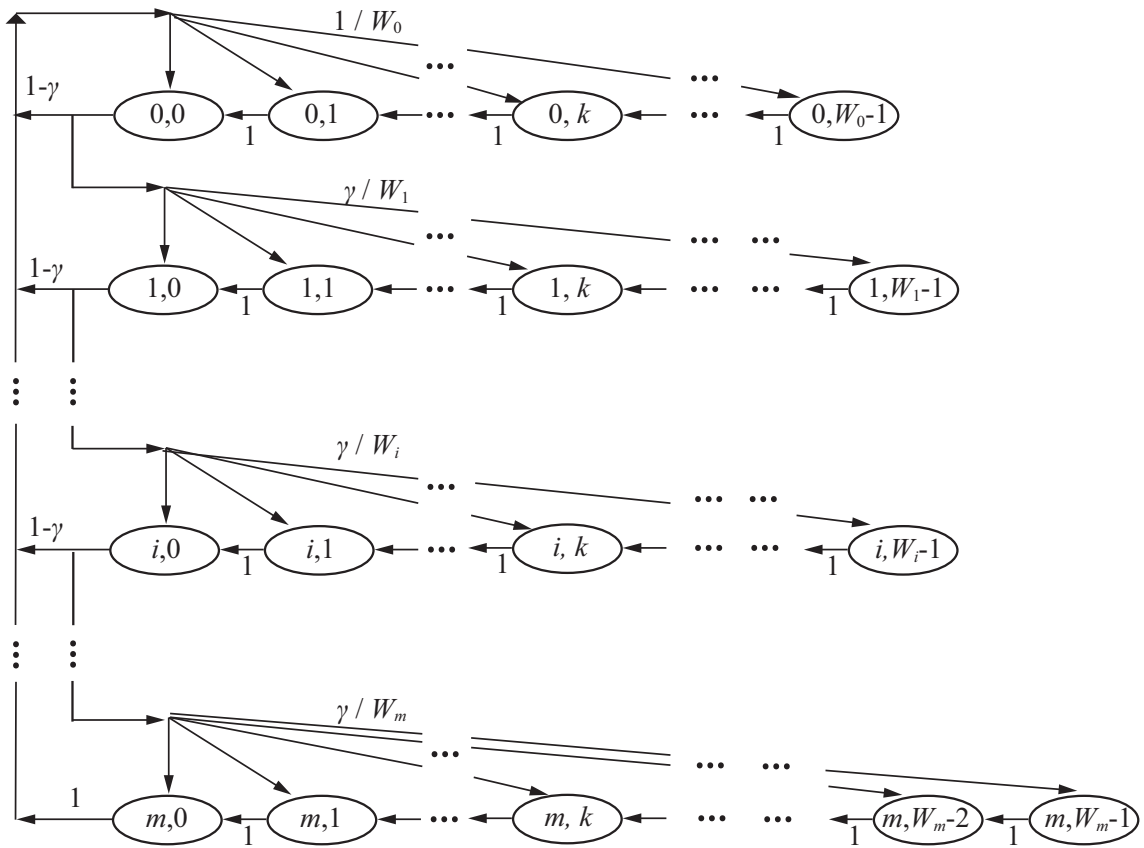


図 2.7: IEEE 802.11 の動作を考慮したマルコフ連鎖モデル

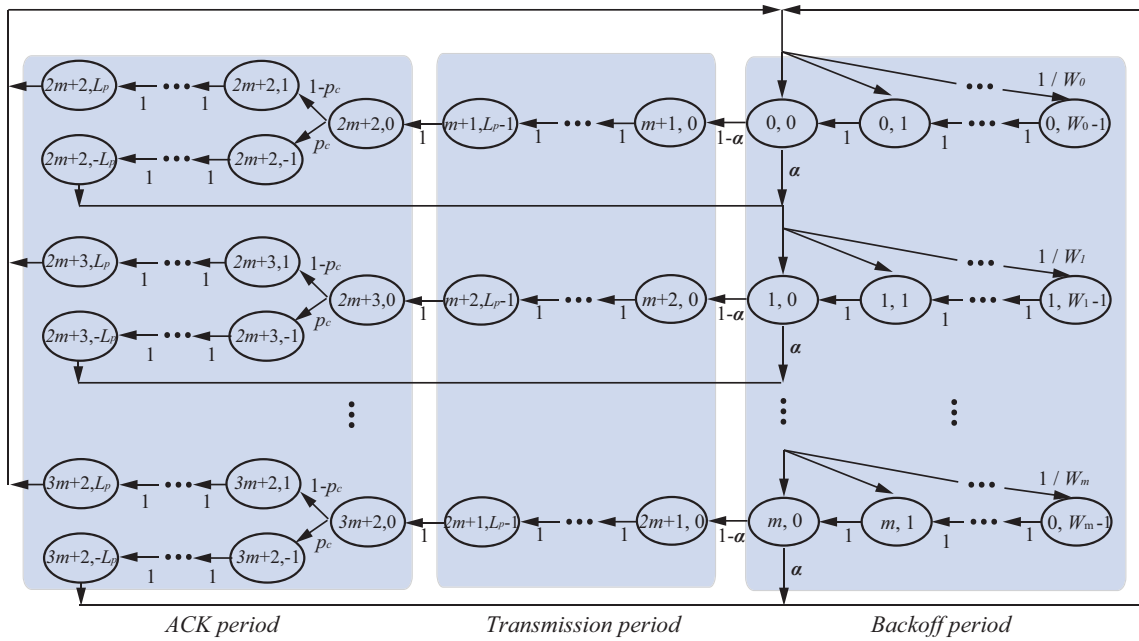


図 2.8: IEEE 802.15.7 の動作を考慮したマルコフ連鎖モデル

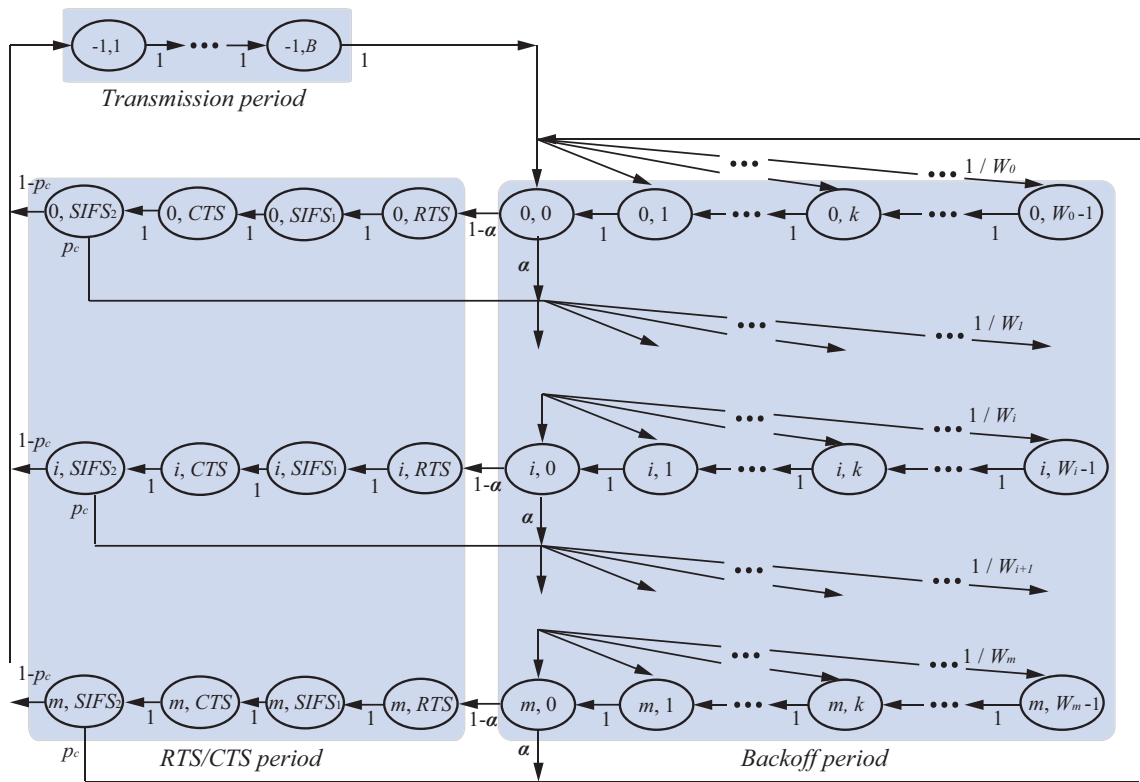


図 2.9: FD-RTS/CTS 方式の動作を考慮したマルコフ連鎖モデル

第3章

FD VLCネットワークにおけるパケット破棄を抑制するバックオフ手法

本章では, CCA 後の BE と NB の増加動作に焦点を当て, FD VLC ネットワークにおけるパケット破棄の抑制を目的とした改良型バックオフ手法の提案を行う. 3.1 節では本研究で対象とするシステムモデルについて記述し, 3.2 節では改良型バックオフ手法の動作およびその効果について記述する.

3.1 システムモデル

図 3.1 に本研究で対象とする FD-VLC ネットワークのネットワーク例を示す. 室内環境を想定しており, 天井に配置した 1 台のコーディネータの送信範囲内に端末を N 台ランダムに配置する. また, コーディネータおよび端末は LED とフォトダイオードで構成されており, データの送受信が可能であるとする. 通信方式は IEEE 802.15.7 MAC を適用し, 端末は CSMA/CA 方式を用いて伝送する. その他の前提を以下に示す.

1. フレーム送信の失敗は衝突によって発生し, 距離減衰を考慮しない理想的な伝搬モデルを使用する.

2. コーディネータは無線全二重通信によって、端末からのデータを受信中にビジー トーン信号を送信することができるとする。
3. FD-RTS/CTS 方式 [15] と同様に、全ての端末は隠れ端末の関係であるが、ビジー トーン信号により、全端末が他の端末が通信中であることを検知できる。

3.2 改良型バックオフ手法

2.2.4 節で述べたように、FD VLC ネットワークにおけるパケット破棄の誘発は、送信権を獲得していない端末のチャネルビジー判定後に IEEE 802.15.7 のバックオフ動作にしたがって BE 値と NB 値を増加させることに起因する。FD VLC ネットワークでは、ビジー トーン信号を用いたことによってフレームの衝突よりも CCA によるチャネルをビジーと判定する機会が多くなってしまい、その結果パケット破棄が頻繁に発生してしまう。そのため、端末の BE と NB の増加する機会を減らすべきであるといえる。そこで、提案手法では端末は CCA のチャネルビジー判定に限り、チャネル状態を確認する前に設定していた BE と NB の値を引き継ぐ。つまり端末は RTS フレームの衝突時のみ BE と NB を増加させる。この動作により端末の BE と NB の値が過度に上昇することを抑制し、端末のパケット破棄を大幅に低減できる。

一方、提案手法におけるチャネルビジー時に BE と NB の値を常に維持する動作は、過剰な送信待機時間延長を招く可能性があり、結果としてパケット送信完了までのアクセス遅延の増大が懸念される。そのため、このアクセス遅延の増大を回避するために、BE と NB の値の維持回数に制限を設けることで、過剰な BE と NB 値の維持を防ぐ。

図 3.2 に提案手法の動作を考慮したフローチャートを示す。ここで、 k は BE と NB の値の維持回数であり、 K は同じバックオフステージ内における維持回数の制限値

を表す。図 3.2 より、端末は RTS フレームの送信前に CCA を行い、チャネルビジーと判定した場合、維持回数 k を 1 増加させる。その後、維持回数 k と最大維持回数 K の大小関係を比べる。維持回数 k が最大維持回数 K 以下の場合には端末は BE と NB の値を維持し、 k が K を超えた場合は BE と NB の値を増加させる。つまり、 $K = 0$ のとき、端末は BE と NB の値を増加させないため、従来手法である FD-RTS/CTS 方式を同様の動作となる。

図 3.3 に提案手法におけるチャネルアクセス例を示す。図 3.3 では、例としてコーディネータと 2 台の端末の動作に着目する。提案手法の動作を示すため、最大維持回数 K の値は 1 であると仮定する。図 3.3(a) 時点において、端末 2 が CCA を行ったとする。その CCA においてチャネルビジー判定されると、(b) 時点に示すように、端末は CCA 終了後に維持回数 k を 1 増加させ、その BE と NB 値を維持する。その後、再び同じ CW 値からバックオフタイムの再選択を行う。一方、図 3.3(c) 時点において、端末 2 が CCA を行いチャネルビジー判定されたとする。この場合、維持回数 k を 1 増加させると最大維持回数 K を超えてしまう。そのため、端末は BE と NB を増加させ、維持回数 k をリセットする。

本提案手法により、端末の BE と NB の値が過度な上昇を抑制し、端末のパケット破棄を低減させることができる。さらに、BE と NB の値の適切な維持回数を設定することで、端末のパケット破棄を低減しつつアクセス遅延の低減を同時に得ることができる。

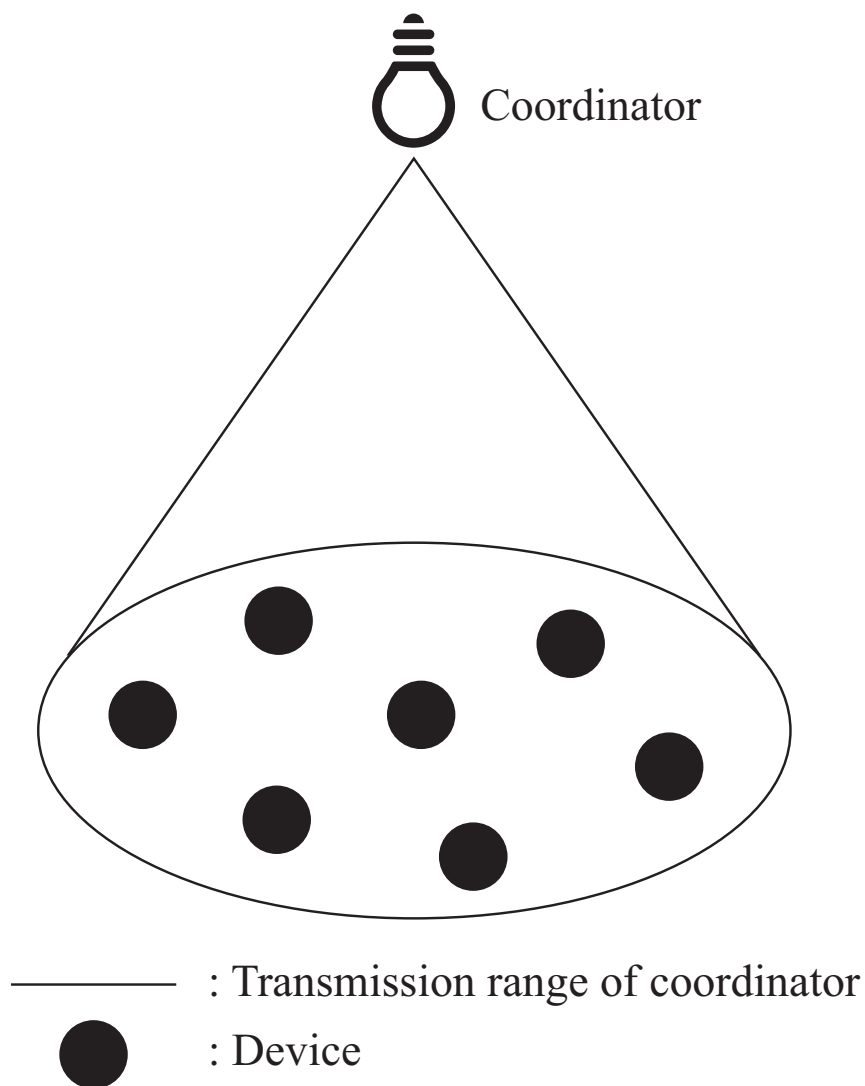


図 3.1: 本研究の対象ネットワークトポロジ

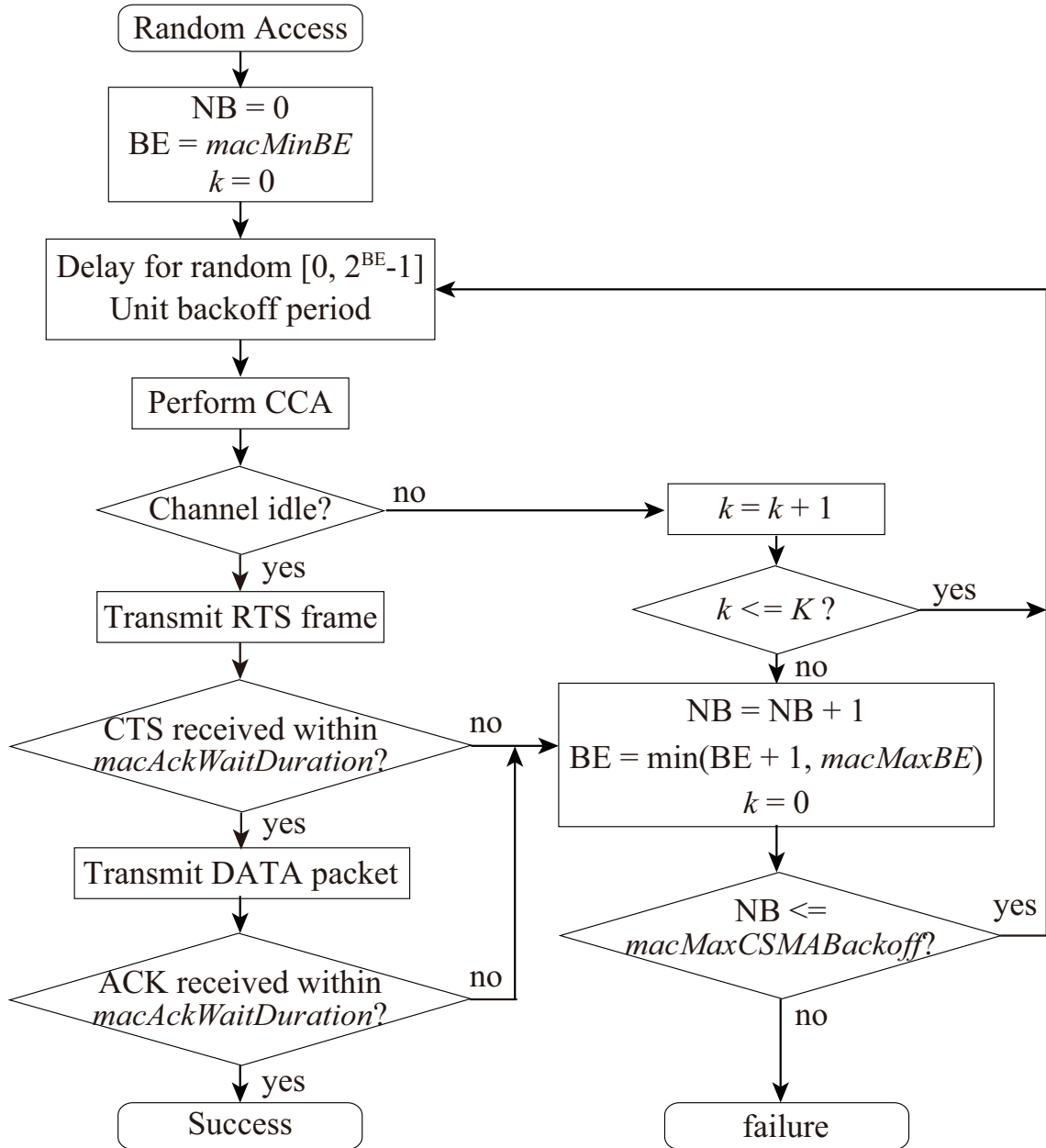


図 3.2: 改良型バックオフ手法のフローチャート

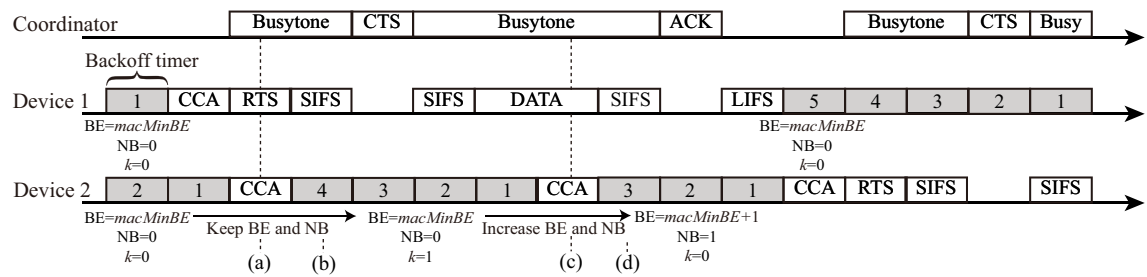


図 3.3: 改良型バックオフ手法におけるチャネルアクセス例

第4章

数理モデルに基づく改良型バックオフ 手法における性能解析

本章では，改良型バックオフ手法における性能解析を行うための理論解析モデルについて記述する．本解析モデルは改良型バックオフ手法の動作を考慮したマルコフ連鎖モデルを用い，各端末の動作を数理モデル化することでパケット破棄率，アクセス遅延，およびネットワークスループットを算出する．4.1節に本解析が対象とする解析の仮定を示す．4.2節では，改良型バックオフ手法の動作を考慮した理論解析モデルについて記述し，理論解析における主要パラメータである CCA 確率，衝突率，およびチャネルビジー率の算出方法を記述する．4.3節では，ネットワークの数理化として，パケット破棄率，アクセス遅延およびネットワークスループットの算出方法について記述する．

4.1 解析の仮定

3.1節で記述したシステムモデルと同様に，図3.1に示すようなネットワーク(1台のコーディネータと N 台の端末)において，下記の仮定のもとで理論解析を行う．

1. VLC ネットワークにおけるアップリンクのみとする．

2. ネットワークトラフィックを O [Mbps] とし、各端末のトラフィックは O/N [Mbps] でそれぞれ等しいとする.
3. 各端末は P [byte] のデータパケットを生成する. パケット到着はポアソン過程に従うとし、各端末のパケット到着率は λ [1/s] とする.
4. コーディネータは端末のデータ送信中にビジートーンを送信するため、隠れ端末による衝突は発生しない. すなわち、複数の端末が同時に RTS フレームの送信を行うことによってのみ送信に失敗する.

4.2 改良型バックオフ手法を考慮した解析モデルの構築

本節では、改良型バックオフ手法の動作を考慮した理論解析モデルについて記述し、ネットワークの性能解析における主要パラメータである CCA 確率、衝突率、およびチャネルビジー率の算出方法を記述する.

4.2.1 改良型バックオフ手法を考慮したマルコフ連鎖モデル

図 4.1 に提案手法の動作を考慮した三次元マルコフ連鎖モデルを示す. このマルコフ連鎖モデルは 2.3.2.2 節で記述した文献 [15] の FD-RTS/CTS 方式を考慮したマルコフ連鎖モデルに基づき、改良型バックオフ手法の動作を新たに考慮している. 図 4.1 のマルコフ連鎖モデルは改良型バックオフ手法におけるバックオフタイマの状態遷移、BE と NB の維持動作、衝突および送信成功による再送回数の状態遷移を示しており、これを解くことにより改良型バックオフ手法の動作を考慮した解析を行う.

図 4.1 のマルコフ連鎖モデルにおいて、各状態 (i, j, k) は、それぞれ端末のバックオフステージ、バックオフタイマおよび同じバックオフステージ内での BE と NB

の維持回数を表している。図 4.1 において、 p_c は各端末における衝突率を示し、送信した RTS フレームが衝突によって失敗する確率として表される。 α はチャネルビジー率を示し、端末が CCA 時にチャネルビジーと判定される確率として表される。 m は最大再送回数を示し、 W_i は再送回数 i に対する CW 値であり

$$W_i = 2^{\min(\text{macMinBE}+i, \text{macMaxBE})} \quad (4.1)$$

と表せる。ここで、 macMinBE と macMaxBE はそれぞれバックオフ指数の最小値と最大値を示す。図 4.1 のマルコフ連鎖モデルは提案手法におけるバックオフタイムの選択およびカウント、RTS フレームと CTS フレームの交換、そしてデータパケットの送信に至るまでの状態を示している。状態 (i, j, k) において、端末は $i \in (0, m)$, $j \in (0, W_i - 1)$, $k \in (0, K)$ のときに「バックオフ期間」であり、 $i \in (0, m)$, $j \in \{RTS, SIFS_1, CTS, SIFA_2\}$ のときに「RTS/CTS 期間」であり、 $i = -1$, $j \in (1, B)$ のときに「送信期間」と定義する。ここで、 B はデータパケットの送信にかかる時間を示し

$$B = T_{\text{DATA}} + T_{\text{SIFS}} + T_{\text{ACK}} + T_{\text{LIFS}} \quad (4.2)$$

で表せる。ただし、 T_{SIFS} と T_{LIFS} はそれぞれ SIFS 期間と LIFS 期間にかかる時間を示し、 T_{DATA} と T_{ACK} はそれぞれデータパケットと ACK フレームの送信にかかる時間を示す。

4.2.2 改良型バックオフ手法における状態遷移確率

本節では，改良型バックオフ手法における状態遷移確率の導出を行う．図 4.1 における RTS/CTS 期間中の遷移確率は

$$\begin{aligned}
 P\{i, SIFS_1|i, RTS\} &= 1, & i \in (0, m), \\
 P\{i, CTS|i, SIFS_1\} &= 1, & i \in (0, m), \\
 P\{i, SIFS_2|i, CTS\} &= 1, & i \in (0, m), \\
 P\{i, j, 0|i-1, SIFS_2\} &= \frac{p_c}{W_i}, & i \in (1, m), j \in (0, W_i - 1), \\
 P\{-1, 1|i, SIFS_2\} &= 1 - p_c, & i \in (0, m)
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

で表せる．また，送信期間における遷移確率は

$$P\{-1, j+1|-1, j\} = 1, \quad j \in (1, B-1) \tag{4.4}$$

で表せる．また，バックオフ期間に関する遷移確率は

$$\begin{aligned}
 P\{i, j, k|i, j+1, k\} &= 1, & i \in (0, m), j \in (0, W_i - 2), & k \in (0, K), \\
 P\{i, RTS|i, 0, k\} &= 1 - \alpha, & i \in (0, m), & k \in (0, K), \\
 P\{0, j, 0|m, SIFS_2\} &= \frac{p_c}{W_0}, & j \in (0, W_0 - 1), \\
 P\{0, j, 0|m, 0, K\} &= \frac{\alpha}{W_0}, & j \in (0, W_0 - 1), \\
 P\{0, j, 0|-1, B\} &= \frac{1}{W_0}, & j \in (0, W_0 - 1)
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

となる．ここで，提案手法における BE と NB の維持に関する遷移確率は

$$\begin{aligned}
 P\{i, j, k|i, 0, k-1\} &= \frac{\alpha}{W_i}, & i \in (0, m), j \in (0, W_i - 1), & k \in (1, K), \\
 P\{i, j, 0|i-1, 0, K\} &= \frac{\alpha}{W_i}, & i \in (1, m), j \in (0, W_i - 1)
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

で表せる．

4.2.3 マルコフ連鎖モデルにおける定常状態確率

本節では、提案手法の動作を考慮したマルコフ連鎖モデルにおける定常状態確率の導出を行う。図4.1において、状態 (i, j, k) の定常状態確率を $b_{(i,j,k)}$ と定義する。式(4.5)と式(4.6)から、バックオフ期間における定常状態確率は

$$b_{(i,j,k)} = \frac{(W_i - j)\alpha}{W_i} \cdot b_{(i,0,k-1)} \quad (4.7)$$

と表せる。式(4.7)において $j = 0$ のとき

$$b_{(i,0,k)} = \alpha \cdot b_{(i,0,k-1)} = \cdots = \alpha^k \cdot b_{(i,0,0)} \quad (4.8)$$

となる。よって、式(4.7)と式(4.8)より

$$b_{(i,j,k)} = \frac{(W_i - j)\alpha^k}{W_i} \cdot b_{(i,0,0)} \quad (4.9)$$

を得る。提案手法において、端末が同じバックオフステージ内で BE と NB を $K + 1$ 回維持するか、RTS フレームの衝突が発生した場合、バックオフステージ数 i は 1 増加される。したがって

$$b_{(1,0,0)} = \alpha b_{(0,0,K)} + p_c b_{(0,SIFS_2)} = X b_{(0,0,0)} \quad (4.10)$$

と表せる。ここで X は同じバックオフステージ内で BE と NB を $K + 1$ 回維持するか、RTS フレームの衝突が発生する確率を示し

$$X = \alpha^{K+1} + p_c(1 - \alpha^{K+1}) \quad (4.11)$$

と表せる。式(4.10)より、バックオフステージ i における $j = 0$ および $k = 0$ である定常状態確率は

$$b_{(i,0,0)} = X b_{(i-1,0,0)} = \cdots = X^i b_{(0,0,0)}, \quad i \in (0, m) \quad (4.12)$$

と表せる。また、式(4.3)より、RTS/CTS期間における定常状態確率は

$$\begin{aligned} b_{(i,j)} &= (1 - \alpha) \sum_{k=0}^K b_{(i,0,k)} \\ &= X^i (1 - \alpha^{K+1}) b_{(0,0,0)}, \text{ for } j \in \{RTS, SIFS_1, CTS, SIFA_2\} \end{aligned} \quad (4.13)$$

と表せる。また、送信期間における定常状態確率は式(4.4)より

$$\begin{aligned} b_{(-1,j)} &= \sum_{i=0}^m (1 - p_c) b_{(i,SIFS_2)} \\ &= (1 - \alpha^{K+1})(1 - p_c) \frac{1 - X^{m+1}}{1 - X} b_{(0,0,0)}, \text{ for } j \in (1, B) \end{aligned} \quad (4.14)$$

で表せる。図4.1のマルコフ連鎖モデルにおける全ての定常状態確率の和は1であるため

$$1 = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^{W_i-1} \sum_{k=0}^K b_{(i,j,k)} + A \sum_{i=0}^m b_{(i,-1)} + B \cdot b_{(-1,1)} \quad (4.15)$$

が得られる。式(4.9), (4.12), (4.13), (4.14), (4.15)から状態(0,0,0)の定常状態確率は

$$\begin{aligned} \frac{1}{b_{(0,0,0)}} &= \frac{1 - \alpha^{K+1}}{1 - \alpha} \sum_{i=0}^m \frac{W_i + 1}{2} X^i + A(1 - \alpha^{K+1}) \frac{1 - X^{m+1}}{1 - X} \\ &\quad + B(1 - p_c)(1 - \alpha^{K+1}) \frac{1 - X^{m+1}}{1 - X} \end{aligned} \quad (4.16)$$

と表せる。ここで、 A はRTS/CTS期間にかかる時間を示し

$$A = T_{RTS} + T_{SIFS} + T_{CTS} + T_{SIFS} \quad (4.17)$$

で表せる。ただし、 T_{RTS} と T_{CTS} はそれぞれRTSフレームとCTSフレームの送信にかかる時間を示す。

4.2.4 CCA 確率の導出

本節では、非飽和状態を考慮した CCA 確率の導出を行う。端末は、バッファ内に少なくとも1つ以上データパケットを持っている場合、コーディネータにデータパケットの送信を行う。ここで、バッファ内に1つ以上のデータパケットがある確率であるパケット存在確率を q と定義する。また、バックオフ期間においてバッファ内に常に1つ以上のデータパケットを持つ(飽和状態における)端末が CCA を行う確率を φ' と定義する。端末が CCA を行う確率である CCA 確率 φ はパケット存在確率と飽和状態における CCA 確率の積として得られ

$$\varphi = q\varphi' \quad (4.18)$$

と表せる。端末のバッファ内に常に1つ以上のパケットがある飽和状態では $q = 1$ を満たす。図4.1において、状態 $(i, 0, k)$, $i \in (0, m)$, $k \in (0, K)$ の定常状態確率の和より、飽和状態における CCA 確率 φ' は

$$\begin{aligned} \varphi' &= \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^K b_{(i,0,k)}}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^{W_i-1} \sum_{k=0}^K b_{(i,j,k)}} = \frac{\frac{1-\alpha^{K+1}}{1-\alpha} \frac{1-X^{m+1}}{1-X} b_{(0,0,0)}}{\frac{1-\alpha^{K+1}}{1-\alpha} \sum_{i=0}^m \frac{W_i+1}{2} X^i b_{(0,0,0)}} \\ &= \frac{1-X^{m+1}}{(1-X) \sum_{i=0}^m \frac{W_i+1}{2} X^i} \end{aligned} \quad (4.19)$$

で表せる。本解析の仮定3より、パケット到着率 λ はポワソン過程に従い、パケット処理率 μ が指数分布に従うと仮定すると、待ち行列理論よりパケット存在確率 q はパケット到着率 λ とパケット処理率 μ の比で与えられるので

$$q = \min\left(\frac{\lambda}{\mu}, 1\right) \quad (4.20)$$

と表せる. パケット処理率 μ は単位時間あたりの平均パケット処理数であるため, アクセス遅延の逆数として表すことができる. 図 4.1 のマルコフ連鎖モデルはデータパケットの送信期間も考慮されているので, アクセス遅延はマルコフ連鎖モデルにおける状態 $(0, 0, 0)$ の平均再帰時間に等しいので, 式 (4.16) より

$$D_{mac} = \frac{1}{b_{(0,0,0)}} = \frac{1}{\mu} \quad (4.21)$$

と表せる. したがって, 式 (4.19), (4.20) および (4.21) を式 (4.18) に代入することで, CCA 確率 φ は

$$\varphi = \min\left(\frac{\lambda}{b_{(0,0,0)}}, 1\right) \cdot \frac{1 - X^{m+1}}{(1 - X) \sum_{i=0}^m \frac{W_i + 1}{2} X^i} \quad (4.22)$$

と表せる.

4.2.5 衝突率の導出

本解析の仮定 4 より, ビジートーンにより隠れ端末の関係にあっても全ての端末は互いの送信を検知できる. したがって, 送信フレームの衝突が発生するのは, 複数の端末が同時にバックオフタイマのカウントを 0 にしたときであるので, 端末の衝突率は

$$p_c = 1 - (1 - \varphi)^{N-1} \quad (4.23)$$

で表せる.

4.2.6 チャンネルビジー率の導出

本研究におけるチャンネルビジー率の定義として, 端末が CCA を行った際にコーディネータからビジートーン信号を受信する確率とする. コーディネータは端末が

RTS フレームもしくはデータパケットの送信中にビジー信号を全端末に送信する。そのため、端末は他の端末が RTS フレームもしくはデータパケットを送信している場合、CCA 時にチャネルビジー判定される。ネットワークにおいて、少なくとも1台が RTS フレームもしくはデータパケット送信する確率は $1 - [1 - \varphi(1 - \alpha)]^{N-1}$ で表せる。また、一度のデータパケットの送信にかかる時間の期待値は $A + B(1 - p_c)$ で表せる。したがって、チャネルビジー率は

$$\alpha = [A + B(1 - p_c)][1 - (1 - \varphi(1 - \alpha))^{N-1}] \quad (4.24)$$

で表せる。

4.2.7 代数方程式とその数値的導出方法

本解析では、3つの未知数 φ , p_c , α から得られる式 (4.22), (4.23), および (4.24) の3つの代数方程式を解くことで任意のトラフィック負荷 O に対して、未知数を得ることができる。本解析では、ニュートン法を用いることでこれらの代数方程式を解き、パケット破棄率およびネットワークスループットを算出する。

4.3 ネットワーク性能の数理化

本節では、4.2節で導出した3つのパラメータ φ , p_c , α を用いてネットワーク性能の数理化を行う。本研究では、ネットワーク性能としてパケット破棄率、アクセス遅延およびネットワークスループットの導出を行い、得られた3つのパラメータを代入することで、これらの値を算出する。

4.3.1 パケット破棄率の導出

提案手法において，端末のバックオフステージが $m + 1$ 回増加した場合にデータパケットが破棄される．したがって，パケット破棄率は

$$p_d = X^{m+1} = [\alpha^{K+1} + p_c(1 - \alpha^{K+1})]^{m+1} \quad (4.25)$$

で表せる．

4.3.2 アクセス遅延の導出

アクセス遅延はデータパケットが送信バッファの先頭に格納されてから，送信に成功するまでの平均遅延である．図 4.1 のマルコフ連鎖モデルはデータパケットの送信期間も考慮されているので，アクセス遅延はマルコフ連鎖モデルにおける状態 $(0, 0, 0)$ の平均再帰時間に等しい．したがって，アクセス遅延は状態 $(0, 0, 0)$ における定常状態確率 $b_{(0,0,0)}$ の逆数で表せるので，式 (4.16) より

$$\begin{aligned} D_{mac} &= \frac{1}{b_{(0,0,0)}} \\ &= \frac{1 - \alpha^{K+1}}{1 - \alpha} \sum_{i=0}^m \frac{W_i + 1}{2} X^i + A(1 - \alpha^{K+1}) \frac{1 - X^{m+1}}{1 - X} \\ &\quad + B(1 - p_c)(1 - \alpha^{K+1}) \frac{1 - X^{m+1}}{1 - X} \end{aligned} \quad (4.26)$$

と表せる．

4.3.3 ネットワークスループットの導出

ネットワークスループットはネットワーク内の端末のスループットの合計で表せる．ここで，端末 1 台におけるスループットを s とする．ネットワークが非飽和状

態 ($q < 1$) のとき, 生起したデータパケットのほとんどはコーディネータに送信される. そのため, 式 (4.25) を用いることで非飽和状態の端末スループットは

$$s = \lambda(1 - p_d)P, \quad \text{for } q < 1 \quad (4.27)$$

で表せる. 一方, 飽和状態 ($q = 1$) では, 端末は常に自身のバッファ内に1つ以上のパケット保持している. したがって, 飽和状態における端末スループットはデータパケットサイズとアクセス遅延の比で表せるので

$$s = \frac{(1 - p_d)P}{D_{mac}}, \quad \text{for } q = 1 \quad (4.28)$$

となる. 式 (4.20), (4.27), (4.28) より, 端末スループットは

$$s = \frac{q(1 - p_d)P}{D_{mac}} \quad (4.29)$$

と表せる. したがって, ネットワークスループットは

$$S = N \times s = N \times \frac{q(1 - p_d)P}{D_{mac}} \quad (4.30)$$

で表せる.

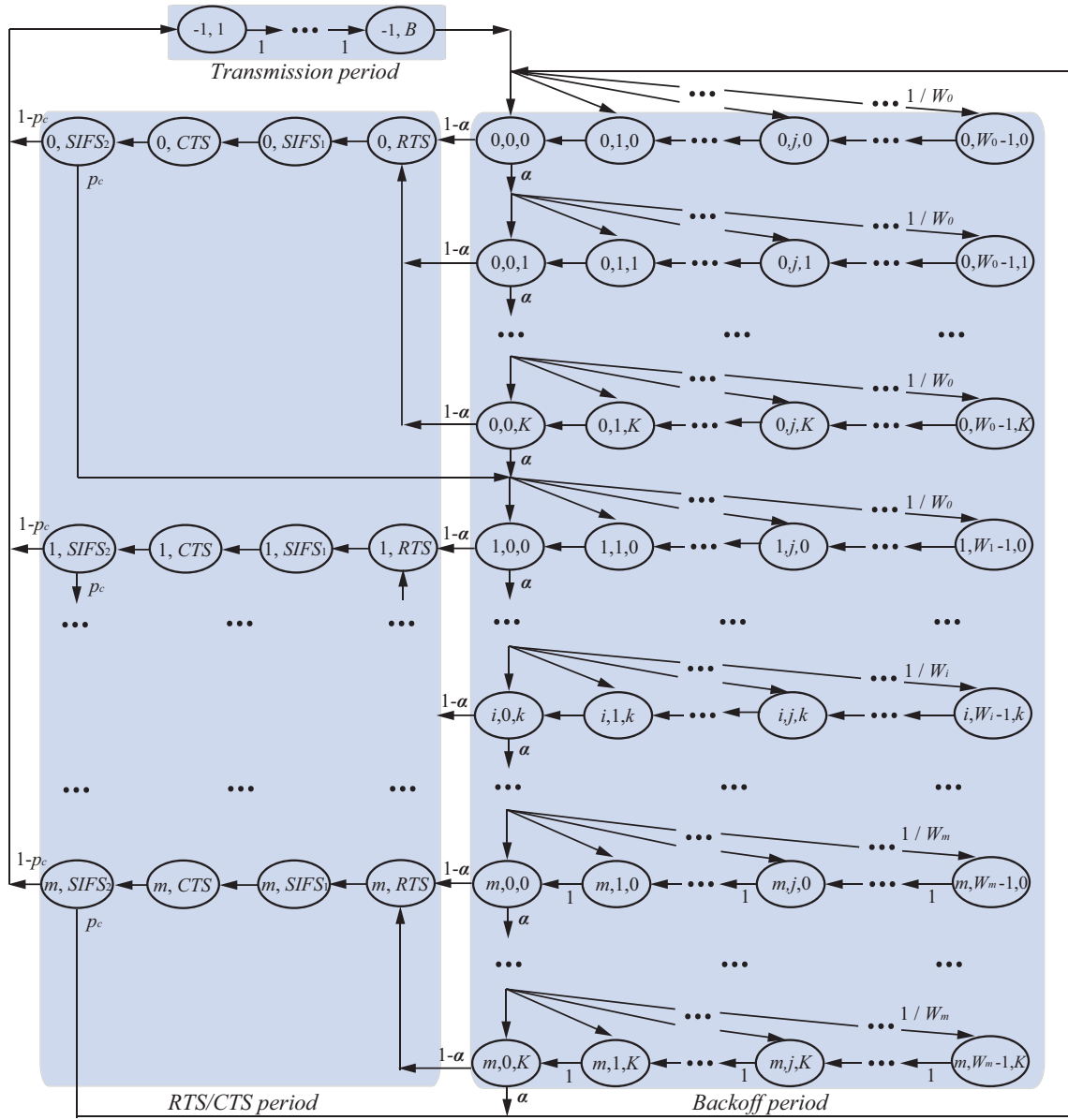


図 4.1: 改良型バックオフ手法を考慮したマルコフ連鎖モデル

第5章

改良型バックオフ手法の性能評価

本章では、計算機シミュレーションと理論解析の結果から改良型バックオフ手法の有効性を確認する。5.1節では、シミュレーションおよび理論解析における評価条件を示す。5.2節ではネットワークのトラフィック負荷に対する性能評価を行う。また、5.3節では、最大維持回数を変化させた場合の性能評価を行う。

5.1 評価条件

本研究における評価条件として、5.1.1節で評価環境、5.1.2節で評価項目、5.1.3で評価対象を記述する。

5.1.1 評価環境

3.1節で記述したシステムモデルで評価を行い、計算機シミュレーションで用いた主要パラメータを表5.1に示す。これらのパラメータはIEEE 802.15.7に準じている。また、屋内での使用を想定しているため、PHY層におけるPHY IIモードを採用する。

5.1.2 評価項目

提案手法の特性を評価する指標として、パケット破棄率、ネットワークスループット、アクセス遅延の各特性を用いた。各評価項目の定義を以下に示す。

- パケット破棄率 p_d : 送信された前データパケット数に対する、最大再送回数に達することによるパケット破棄数の割合で表され、以下の式で算出する。

$$p_d = \frac{num_{fail}}{num_{tx}} \quad (5.1)$$

ここで、 num_{tx} はネットワーク全体でシミュレーション時間内に送信されたデータパケット数、 num_{fail} は送信されたデータパケットのうち、最大再送回数に達することによる送信失敗数をそれぞれ表す。

- ネットワークスループット S : 1秒あたりのコーディネータにおける受信成功情報量 [bps] を示し、以下の式で算出する。

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{8 \times P \times num_{suc}^i}{T_{sim}} [\text{bps}] \quad (5.2)$$

ここで、 num_{suc}^i は端末 i が送信に成功したデータパケット数、 T_{sim} はシミュレーション時間、 N は端末数を示す。

- アクセス遅延 D_{mac} : 全端末において、データパケットが送信バッファの先頭にされてから、そのデータパケットが送信成功によってバッファから破棄されるまでの平均時間を示し、以下の式で算出する。

$$D_{mac} = \frac{\sum_{i=1}^{num_{suc}} (t_{suc}^i - t_{store}^i)}{num_{suc}} \quad (5.3)$$

ここで、 num_{suc} はネットワーク全体でシミュレーション時間内に送信に成功したデータパケット数、 t_{suc}^i は i 番目に送信に成功したデータパケットの送信成

功時間, t_{store}^i は i 番目に送信に成功したデータパケットが送信バッファの先頭に格納された時間を示す.

5.1.3 評価対象

本研究では, 2.2.3 節でその動作を記述した FD-RTS/CTS 方式 [15] と, 3 章で記述した改良型バックオフ手法を評価対象とする.

5.2 ネットワークのトラヒック負荷に対する性能評価

本節では, ネットワークのトラヒック負荷に対する性能評価を行う. 本節における改良型バックオフ手法の最大維持回数 K は無限に設定している. つまり, 改良型バックオフ手法においてチャネルビジー判定された場合, 必ず BE と NB の値を維持する. 実線および破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結果を示す.

5.2.1 トラヒック負荷に対するパケット破棄率

図 5.1 に端末数 $N = 5$ におけるトラヒック負荷に対するパケット破棄率を示す. 図 5.1 より各トラヒック負荷において解析結果とシミュレーション結果が定性的に一致していることが確認でき, 任意のトラヒック負荷における解析モデルの妥当性が確認できる. 図 5.1 より, FD-RTS/CTS 方式は非飽和状態であるにも関わらずパケット破棄率が高くなっている. これは, チャネルビジー判定された場合に BE と NB を増加させる動作により端末の最大再送回数に達してしまうためである. 一方, 提案手法を用いることにより, どのトラヒック負荷に対してもパケット破棄率がほ

ほぼ0となっていることがわかる。したがって、改良型バックオフ手法の維持動作によってパケット破棄を大幅に低減できることがわかる。

5.2.2 トラヒック負荷に対するネットワークスループット

図5.2に端末数 $N = 5$ におけるトラヒック負荷に対するネットワークスループットを示す。図5.1より各トラヒック負荷において解析結果とシミュレーション結果が定性的に一致していることが確認でき、任意のトラヒック負荷における解析モデルの妥当性が確認できる。図5.2より、提案手法は非飽和状態においてネットワークスループットがトラヒック負荷と等しい値を示していることが分かる。これは図5.1で示したように非飽和状態であってもパケット破棄率がほぼ発生していないためである。一方、FD-RTS/CTS方式では非飽和状態においてネットワークスループットがトラヒック負荷よりも小さな値を示している。これは非飽和状態であってもパケット破棄が頻繁に発生するためである。したがって、パケット破棄率を低減させることでネットワークスループットを向上させることができる。

5.2.3 トラヒック負荷に対するアクセス遅延

図5.3に端末数 $N = 5$ におけるトラヒック負荷に対するアクセス遅延を示す。図5.3より各トラヒック負荷において解析結果とシミュレーション結果が定性的に一致していることが確認でき、任意のトラヒック負荷における解析モデルの妥当性が確認できる。図5.3に示すように提案手法のアクセス遅延がFD-RTS/CTS方式に比べて増加する。これは、チャネルビジー判定された場合必ずBEとNBの値を維持することに起因する。送信権を得られなかった端末は他端末の送信中にBEとNBの

値が維持され続ける。つまり、送信権を得るまでバックオフ期間で待機し続けることになりアクセス遅延が増加してしまう。

5.2.4 パケット破棄が発生しない環境でのアクセス遅延

図5.1, 5.2, および5.3より, 改良型バックオフ手法のBEとNBの値の維持動作によってパケット破棄率をほぼ0にしたことによってネットワークスループット向上を達成できた一方で, アクセス遅延が増大してしまう。そこで, 提案手法のBEとNBを維持する動作の有効性を確認するために, 改良型バックオフ手法とFD-RTS/CTS方式をパケット破棄が起こらない条件に設定したときの評価を行う。FD-RTS/CTS方式において, パケット破棄が発生しない環境を想定するために, 最大再送回数 $m = 1000$ と極端に大きな値に設定している。図5.4に端末数 $N = 5$ におけるトラヒック負荷に対するアクセス遅延を示す。図5.4より, パケット破棄が発生しない環境では改良型バックオフ手法のアクセス遅延がFD-RTS/CTS方式に比べ小さくなるのが分かる。これは, 改良型バックオフ手法のBEとNBを維持する動作によって選択するバックオフタイマの値が小さくなり, バックオフ期間における待機時間が減少したためである。したがって, 提案手法とFD-RTS/CTS方式を同じ条件下で評価した場合, 提案手法の維持動作によって性能が向上していることがわかる。したがって, 提案手法のBEとNBの値を維持する動作の有効性が確認できる。

5.3 改良型バックオフ手法における最大維持回数に対する性能評価

5.2節より，提案手法のBEとNBの維持動作によって，ネットワークスループットは向上したものの，アクセス遅延は大きくなってしまふ．つまり，ネットワークスループットとアクセス遅延はトレードオフの関係にあることが分かる．そこで本節では改良型バックオフ手法における最大維持回数 K を変化させた場合の性能評価を行う．ここで，図5.5, 5.6, および5.7において最大維持回数 K の値を0, 1, 5, 30に設定している． $K = 0$ の場合はチャネルビジー判定時にBEとNBを維持しないためFD-RTS/CTS方式と同様の動作になる．

5.3.1 最大再送回数に対するパケット破棄率

図5.5に端末数 $N = 5$ における最大維持回数を変化させたときのトラヒック負荷に対するパケット破棄率を示す．図5.5に示すように，最大維持回数 K の増加に伴いパケット破棄率が減少している．これは，最大維持回数 K が大きくなるほどBEとNBの維持動作が多くなる．その結果，端末のバックオフステージが大きくなりにくくなり，最大再送回数に達することによるパケット破棄が減少する．

5.3.2 最大再送回数に対するネットワークスループット

図5.6に端末数 $N = 5$ における最大維持回数を変化させたときのトラヒック負荷に対するネットワークスループットを示す．図5.6より，最大維持回数 $K \leq 5$ の場合， K の増加に伴い非飽和状態におけるネットワークスループットも増加している

ことがわかる。これは、BEとNBの維持動作によってパケット破棄率を低減できているためである。しかし、 $K = 5, 30$ においては、ネットワークスループットがほぼ同等の結果となっている。したがって、改良型バックオフ手法においてBEとNBの維持回数を極端に大きくしなくてもネットワークスループットを大きくすることができる。

5.3.3 最大再送回数に対するアクセス遅延

図5.7に端末数 $N = 5$ における最大維持回数を変化させたときのトラヒック負荷に対するアクセス遅延を示す。図5.7に示すように、最大維持回数 K の増加に伴いアクセス遅延が増加している。これは、最大維持回数 K が大きくなるほど送信権を得られなかった端末はBEとNBの維持動作が多くなる。その結果、送信権を得られるまでバックオフ期間で待機し続けてしまい、アクセス遅延が増加してしまう。

5.3.4 最適な最大維持回数の導出

高いネットワークスループットを達成するためには、パケット破棄率を低減する必要がある。しかし、パケット破棄率を減少するために最大維持回数 K の値を大きくすると、アクセス遅延が大きくなってしまい、アプリケーションの要求遅延以上となる場合がある。そのため、アプリケーションの要求条件を設定し、条件を満たしつつネットワークスループットを最大とする最大維持回数 K を導出する。表5.2に最適な最大維持回数とスループット利得を示す。ここで、 K^* は要求遅延を満たしつつネットワークスループットを最大にするときの最大維持回数である。表5.2において、トラヒック負荷は 15 [Mbps](非飽和状態) とし、アプリケーションの要

求遅延を $50 [\mu\text{s}]$ と設定している。つまり、設定した遅延の上限値である $50 [\mu\text{s}]$ 以下を達成しつつ、ネットワークスループットが最大となるときの維持回数 K^* を用いたときのパケット破棄率とネットワークスループットの評価を行う。表 5.2 より、FD-RTS/CTS 方式 ($K = 0$) はトラヒック負荷 $15 [\text{Mbps}]$ に対してネットワークスループットが低い値となっている。これは、非飽和状態であってもパケット破棄が頻繁に発生するためである。一方、提案手法は最適な最大維持回数 K^* と用いることで要求遅延を満たしつつ、FD-RTS/CTS 方式に比べネットワークスループットが大きくなることがわかる。また、表 5.2 より端末数の増加に伴い K^* の値が小さくなる。これは、端末数が増加するとチャンネルにアクセスする機会が少なくなりアクセス遅延が大きくなるため、維持動作が多くなるとアクセス遅延が要求遅延以上の値とあるためである。しかし、任意の端末数においてパケット破棄率とネットワークスループットは FD-RTS/CTS 方式よりも性能が向上していることがわかる。以上のことから、最適な最大維持回数 K^* を適用することでアプリケーションの要求遅延を満たしながらパケット破棄率の抑制を確認でき、ネットワークスループットを最大化することができる。したがって、提案手法における最適な最大維持回数 K^* の有効性が確認される。

表 5.1: シミュレーション諸元

Data rate	24 [Mbps]
Data payload size (P)	50 [bytes]
RTS time (T_{RTS})	20 [optical clocks]
CTS time (T_{CTS})	20 [optical clocks]
ACK time (T_{ACK})	20 [optical clocks]
LIFS time (T_{LIFS})	40 [optical clocks]
SIFS time (T_{SIFS})	20 [optical clocks]
CCA time	20 [optical clocks]
Slot time	20 [optical clocks]
Optical clock rate	60 [MHz]
$macMinBE$	3
$macMaxBE$	5
$macMaxCSMABackoffs$	4

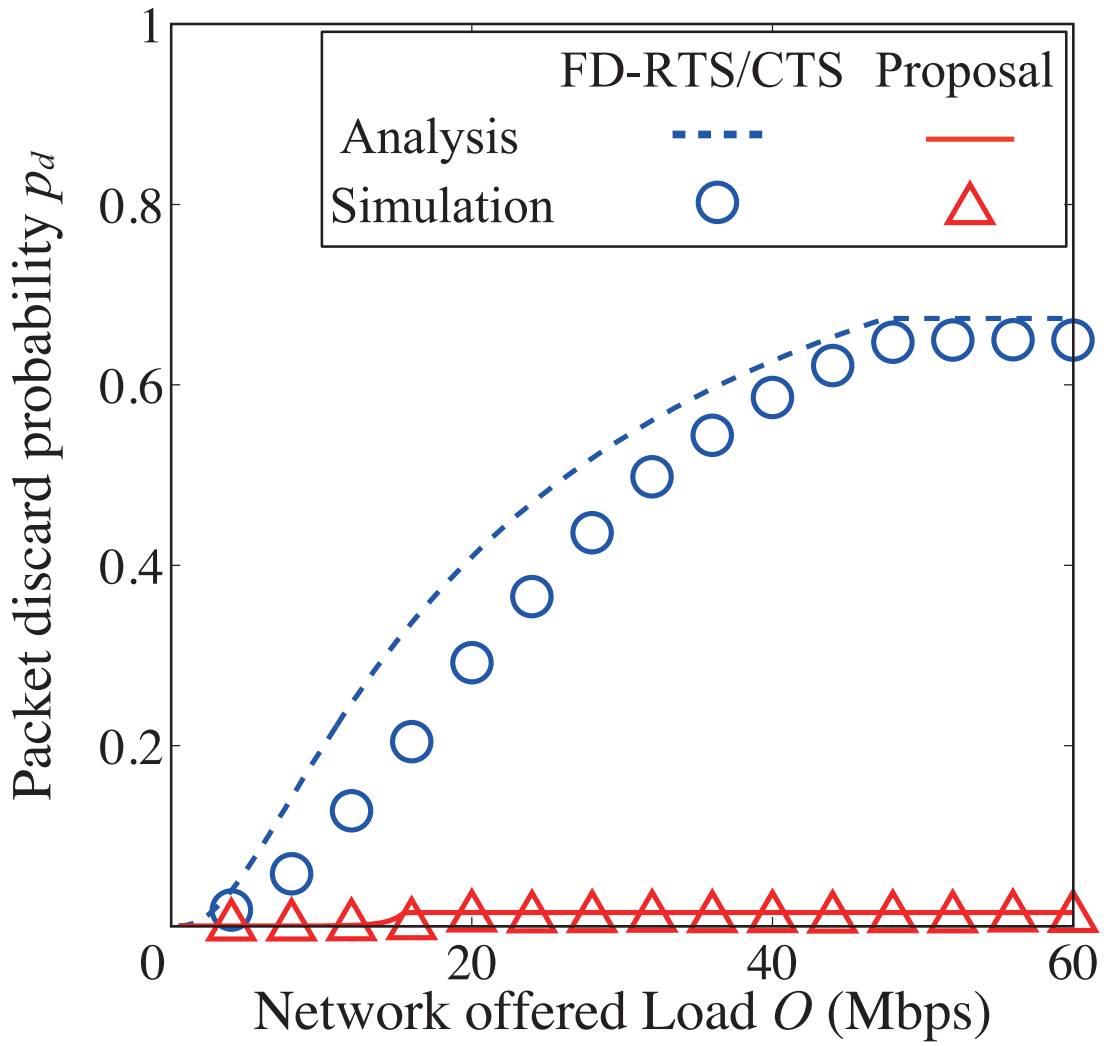


図 5.1: 端末台数 $N = 5$ におけるトラヒック負荷に対するパケット破棄率

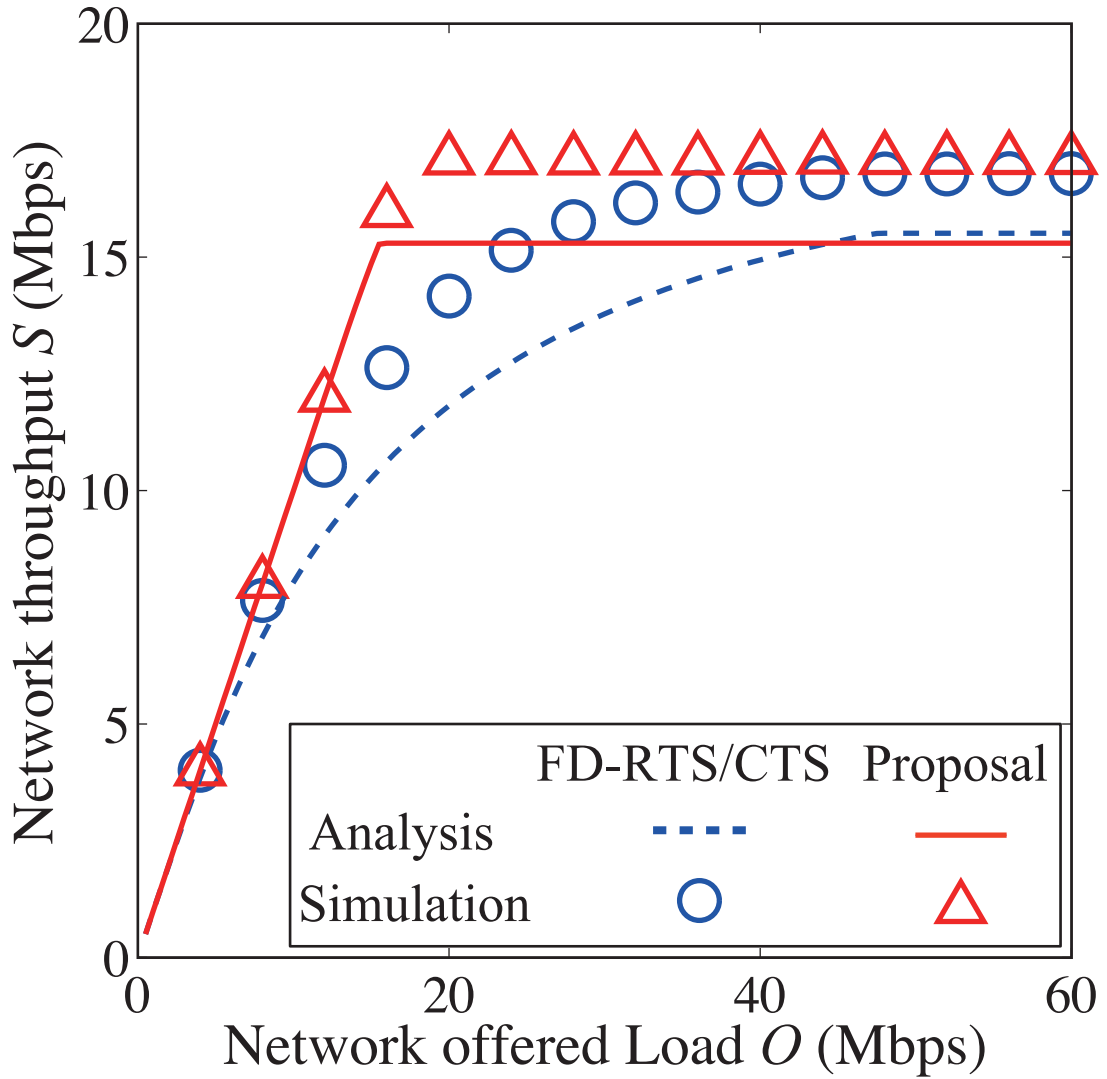


図 5.2: 端末台数 $N = 5$ におけるトラヒック負荷に対するネットワークスループット

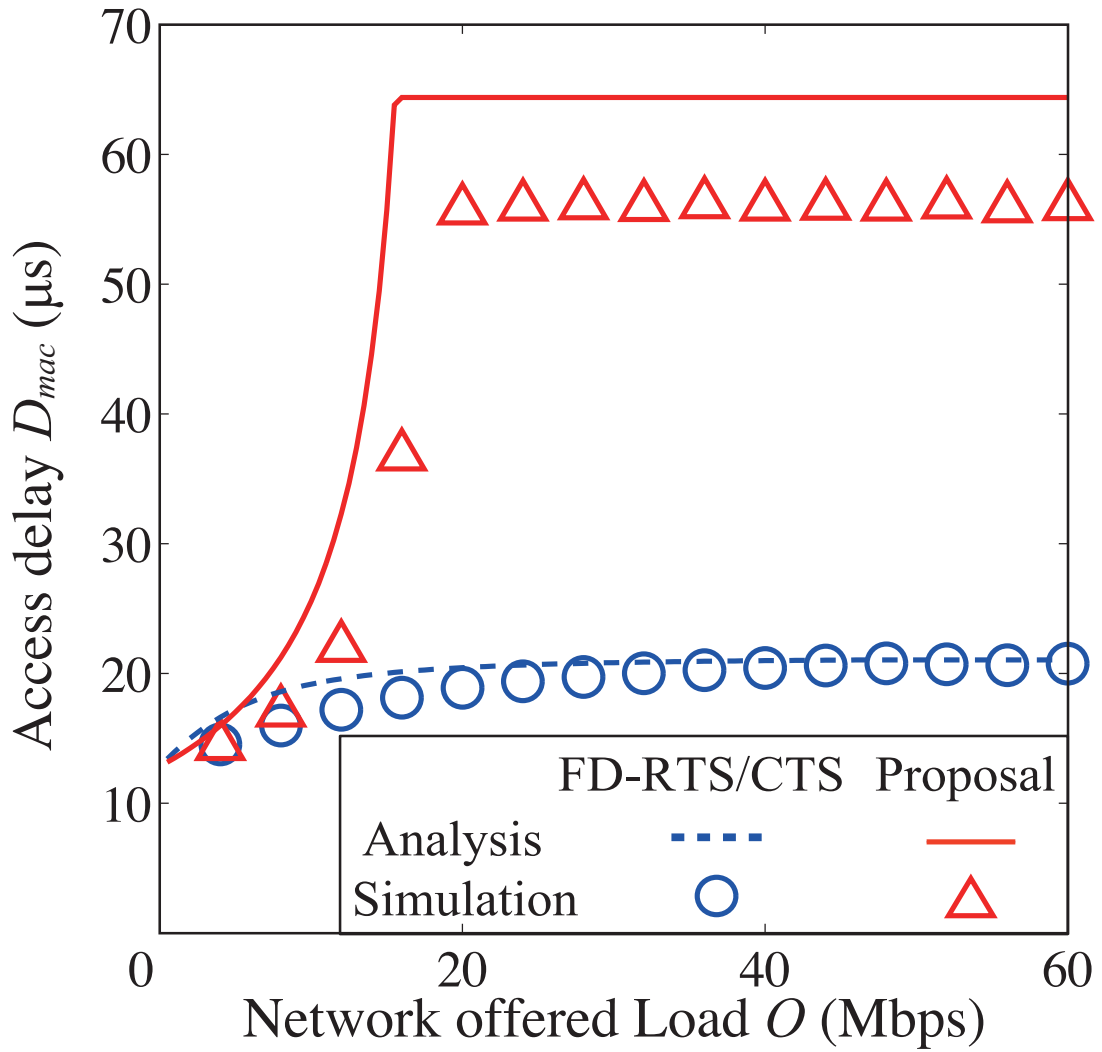


図 5.3: 端末台数 $N = 5$ におけるトラフィック負荷に対するアクセス遅延

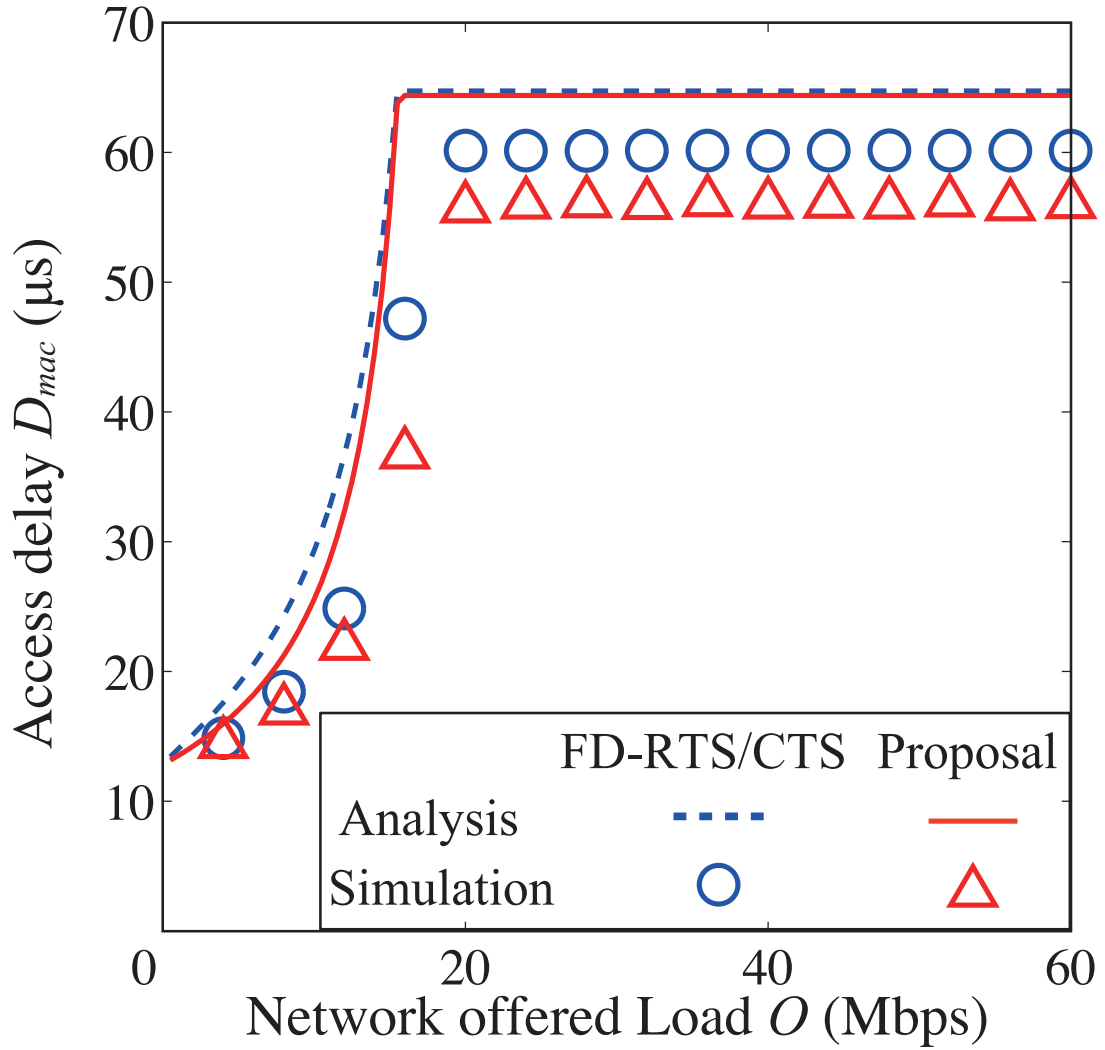


図 5.4: 端末台数 $N = 5$ におけるパケット破棄が発生しない環境でのアクセス遅延

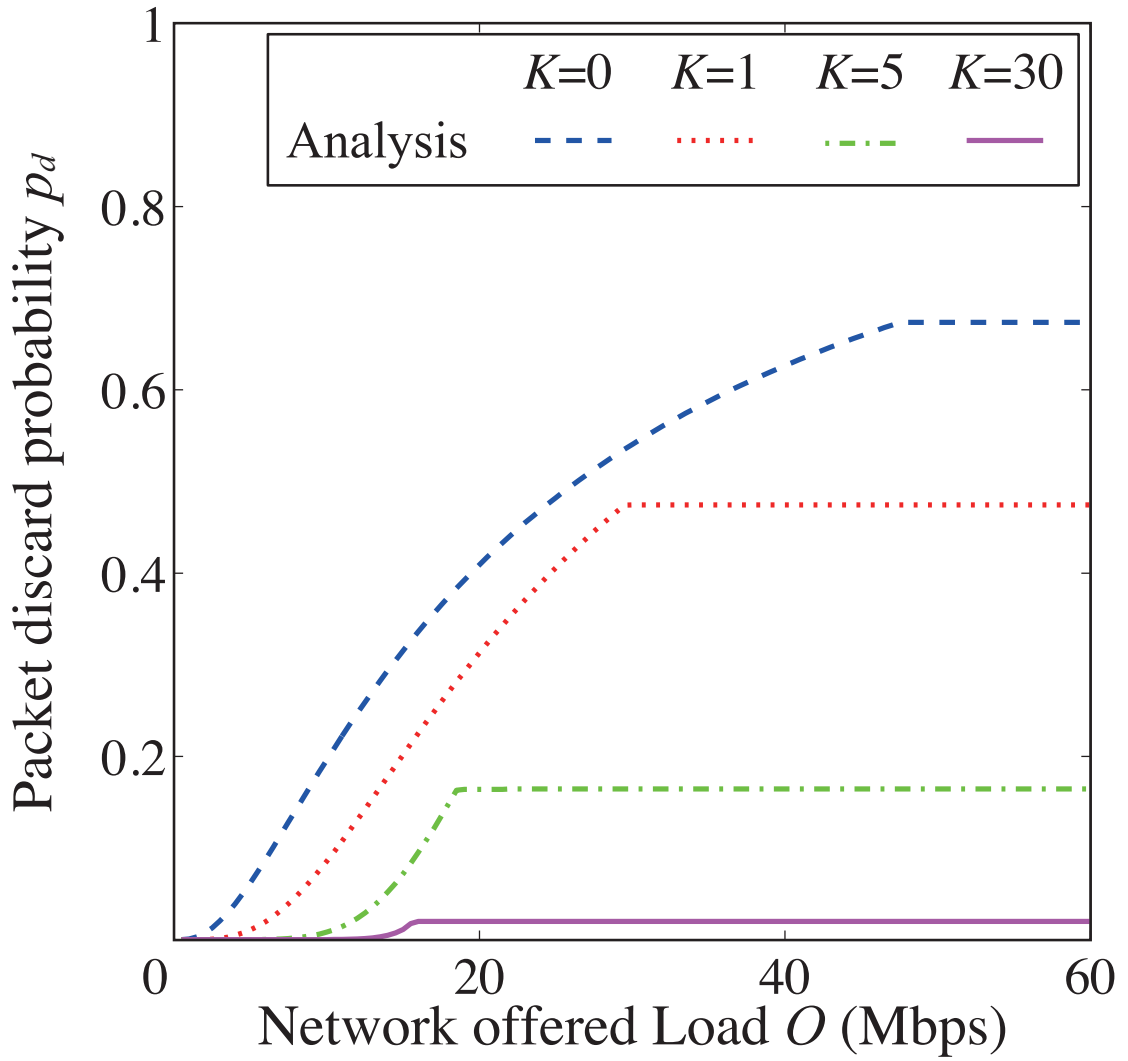


図 5.5: 端末台数 $N = 5$ におけるトラヒック負荷と最大維持回数に対するパケット破棄率

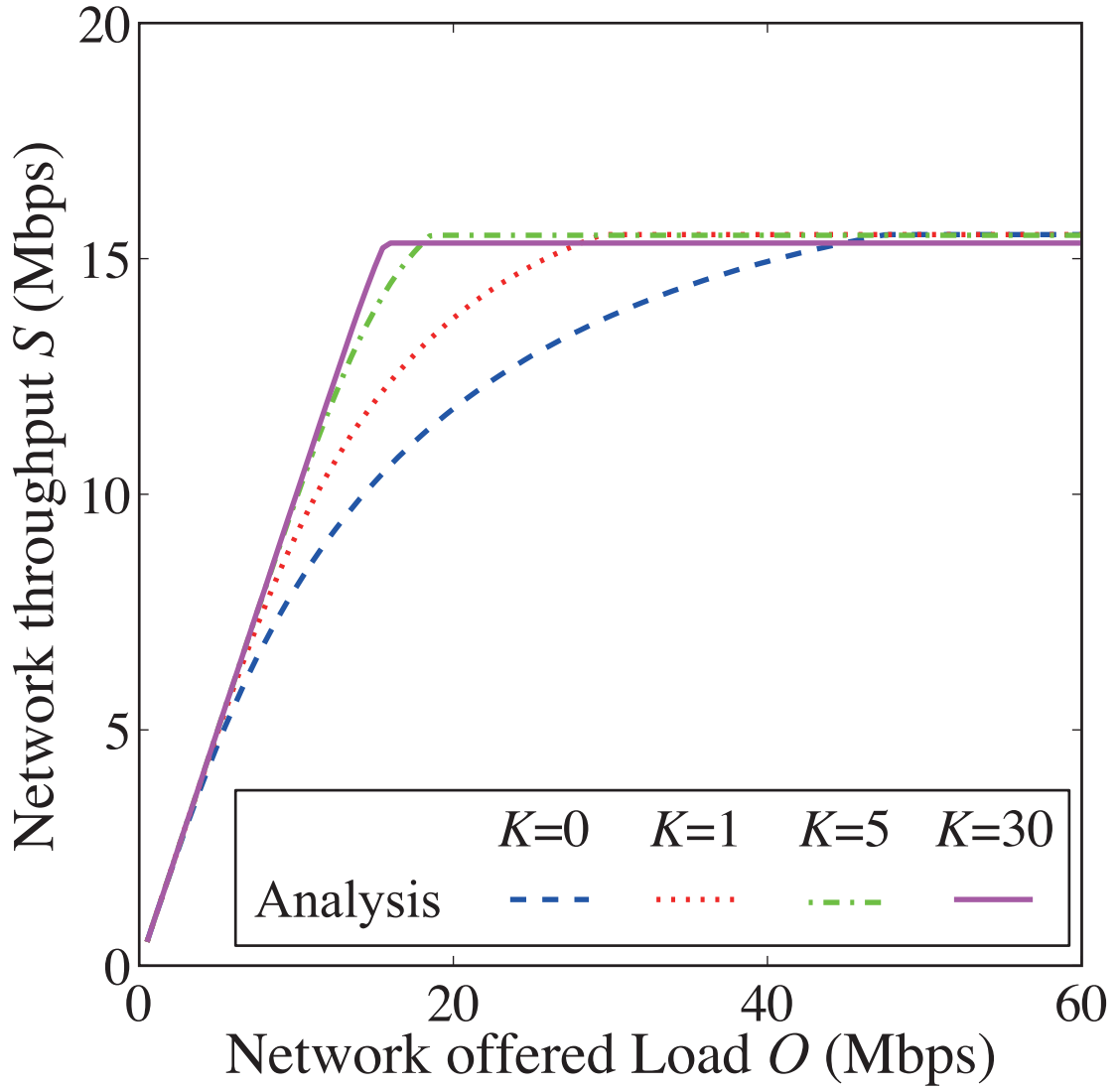


図 5.6: 端末台数 $N = 5$ におけるトラフィック負荷と最大維持回数に対するネットワークスループット

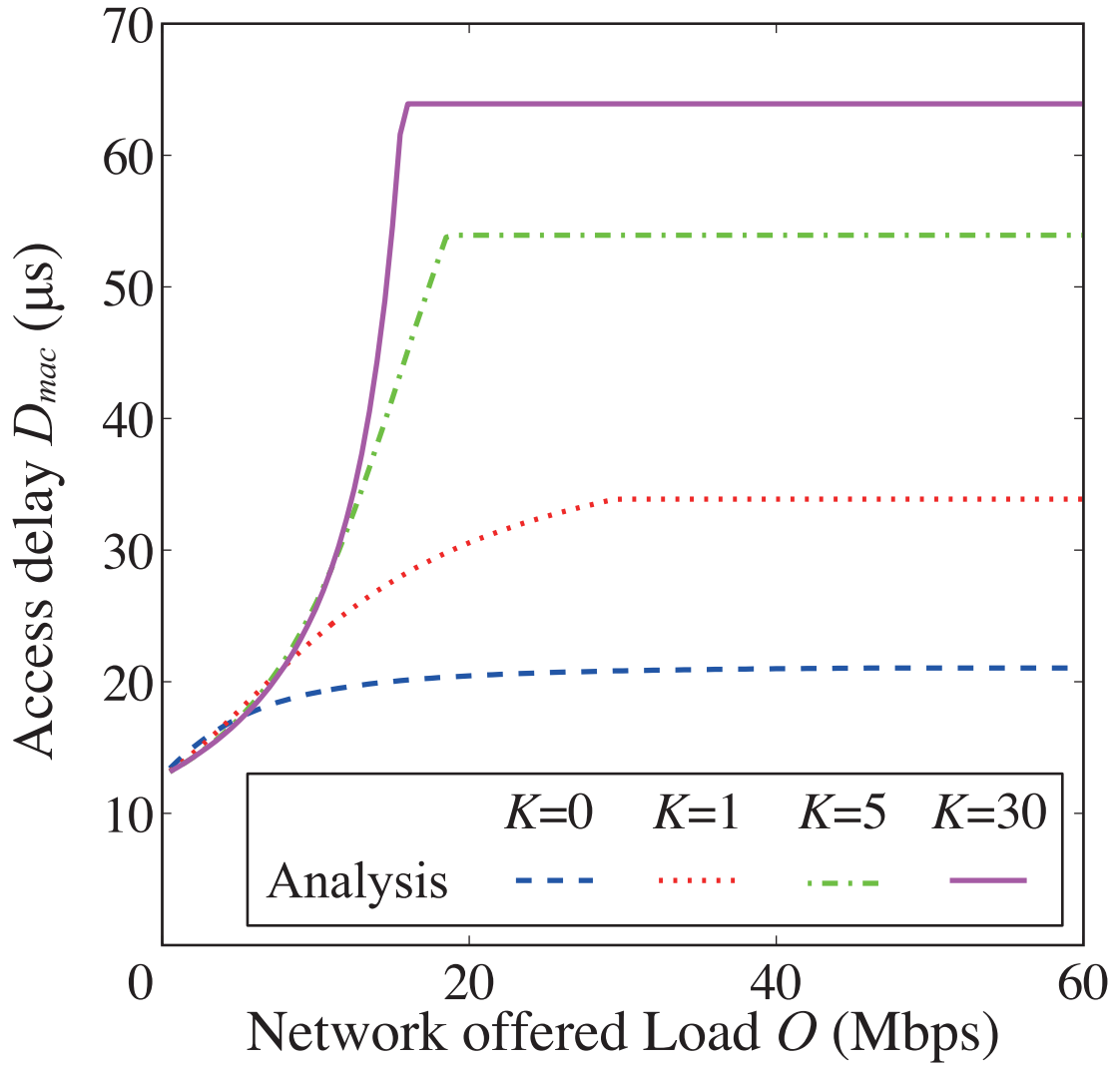


図 5.7: 端末台数 $N = 5$ におけるトラフィック負荷と最大維持回数に対するアクセス遅延

表 5.2: 最適な最大維持回数とスループット利得

N	K^*	Network	Packet discard	Network	Packet discard	Gain
		throughput for K^*	probability for K^*	throughput for $K = 0$	probability for $K = 0$	
5	12	14.58 Mbps	2.769 %	10.27 Mbps	31.55 %	1.42
10	5	13.27 Mbps	11.56 %	9.71 Mbps	35.28 %	1.37
15	4	12.78 Mbps	14.80 %	9.53 Mbps	36.44 %	1.34

第6章

まとめ

本論文では、FD VLC ネットワークにおけるパケット破棄を抑制する改良型バックオフ手法に関する研究を行った。電波の代わりに可視光を用いて通信を行う VLC ネットワークによって、無線周波数帯域の圧迫を解消できると期待されている。VLC ネットワークでは、可視光の持つ指向性に起因した深刻な隠れ端末問題に対処するために無線全二重通信を適用する FD VLC ネットワークが検討されている。FD VLC ネットワークでは、ある端末の送信中にコーディネータは全端末に向け情報を持たないビジートン信号を送信することで、信号の同時送信を回避することができる。しかし、FD VLC ネットワークでは、ビジートン受信時の端末のバックオフ動作に起因して送信パケットの破棄が誘発され、スループット性能の大幅な劣化原因となっていた。

本研究では、FD VLC ネットワークにおけるパケット破棄を抑制することでネットワークスループット向上を目的とし、改良型バックオフ手法を提案した。提案手法では、端末がチャンネルビジー判定および衝突時に増加させていた BE と NB の値をチャンネルビジー判定には増加させずチャンネル状態を確認する前に設定していた BE と NB の値を引き継ぐ。提案手法により端末の再送回数が過度に引き上げられることを抑制し、端末のパケット破棄を低減できる。しかし、提案手法におけるチャンネルビジー時に BE と NB の値を維持する動作は、過剰な送信待機時間を招く可能性が

あり、結果としてパケット送信完了までの遅延の増大が懸念される。そのため、BEとNBの値の維持回数に制限を設けることで、過剰なBEとNBの値の維持を防ぐ。これにより、パケット破棄を低減しつつアクセス遅延の低減を同時に得ることができ、提案手法の動作を実装した計算機シミュレーションの実施することで、提案手法の有効性の評価を行った。また、提案手法の動作を考慮した理論解析モデルを新たに構築し、提案手法の妥当性を示した。

性能評価では、計算機シミュレーションおよび理論解析モデルを用いて、ネットワークのトラフィック負荷に対するパケット破棄率、アクセス遅延、ネットワークスループットの各特性を評価した。その結果、任意のトラフィック負荷において提案手法は従来手法と比較してパケット破棄の低減が確認された。また、提案手法は特に非飽和環境において、従来手法より高スループットの特性を示した。一方で、提案手法のBEとNBの値の維持動作に起因した遅延性能の増加が確認された。そこで、提案手法のBEとNBの維持動作の有効性を確認するために、端末のパケットが破棄されない環境において遅延性能の評価を行い、提案手法による遅延性能の向上を示した。

次に、提案手法におけるBEとNBの値の維持回数を変化させたときの性能評価を行った。その結果、維持回数の増加に伴い、パケット破棄率の低減およびスループット性能の向上を示した一方で、アクセス遅延が増加したことが確認できた。そこで、アクセス遅延に上限値を設け、その条件内でネットワークスループットを最大とする最適な維持回数の導出を理論解析モデルを応用することで導出した。その最適な維持回数を適用することで、要求した遅延条件を満たしながら従来手法に比べてネットワークスループットの向上を確認した。

参考文献

- [1] 中川 正雄, “可視光通信とは,” 信学誌, vol. 101, no. 1, pp. 32–37, 2018年1月.
- [2] 山里 敬也, 岡田 啓, “可視光通信実用化技術,” 信学誌, vol. 101, no. 1, pp. 59–65, 2018年1月.
- [3] A. Jovicic, J. Li, T. Richardson, “Visible Light Communication: Opportunities, Challenges and the Path to Market,” IEEE Communications Magazine, vol. 51, no. 12, pp. 26–32, Dec. 2013.
- [4] L. E. M. Matheus, A. B. Vieira, L. F. Vieira, M. A. Vieira, O. Gnawali, “Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 4, pp. 3204–3237, Apr. 2019.
- [5] 中川 正雄, “ユビキタス可視光通信,” 信学論 (B), vol. J88-B, no. 2, pp. 351–359, 2005年2月.
- [6] V. V. Mai, T. C. Thang, A. T. Pham, “CSMA/CA-based Uplink MAC Protocol Design and Analysis for Hybrid VLC/Wifi Networks,” Proceedings of The 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), May 2017.

- [7] W. Zhang, L. Chen, X. Chen, Z. Yu, Z. Li, W. Wang, “Design and Realization of Indoor VLC-Wi-Fi Hybrid Network,” *Journal of Communications and Information Networks*, vol. 2, iss. 4, pp. 75–87, Dec. 2017.
- [8] M. Amjad, H. K. Qureshi, S. A. Hassan, A. Ahmad, S. Jangsher, “Optimization of MAC Frame Slots and Power in Hybrid VLC/RF Networks,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 21653–21664, Jan. 2020.
- [9] IEEE Standards Association, “IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light,” *IEEE Standards Association*, vol. 802, pp. 7–2011, Sep. 2011.
- [10] C. L. Bosch, I. A. Gonzalez, D. S. Rodriguez, M. A. Q. Suarez, “Analysis of the Effects of the Hidden Node Problem in IEEE 802.15. 7 Uplink Performance,” *Proceedings of The 2015 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS)*, Jul. 2015.
- [11] E. T. Zapata, V. Guerra, J. Rabadan, M. L. Rivera, R. P. Jimenez, “MAC/PHY Comprehensive Visible Light Communication Networks Simulation,” *Sensors*, vol. 20, no. 21, pp. 6014, Oct. 2020.
- [12] C. L. Bosch, I. A. Gonzalez, D. S. Rodriguez, C. R. Casanas, “Evaluation of the Effects of Hidden Node Problems in IEEE 802.15.7 Uplink Performance,” *Sensors*, vol. 16, no. 2, pp. 216, Feb. 2016.
- [13] 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.

-
- [14] Z. Zhang, X. Yu, L. Wu, J. Dang, V. O. K. Li, “Performance Analysis of Full-Duplex Visible Light Communication Networks,” Proceedings of The 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), Jun. 2015.
- [15] P. Lin, L. Zhang, “Full-duplex RTS/CTS aided CSMA/CA Mechanism for Visible Light Communication Network with Hidden Nodes under Saturated Traffic,” Proceedings of The 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC), May 2018.
- [16] X. Wang, W. Chen, “Design and Optimization of a Full Duplex CSMA/CA Medium Access Mechanism for Hybrid Visible Light Communication Networks,” Proceedings of The 2020 IEEE 9th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), Dec. 2020.
- [17] K. I. X. Lin, K. Hirohashi, “High-Speed Full-Duplex Multiaccess System for LED-Based Wireless Communications Using Visible Light,” Proceedings of The International Symposium on Optical Engineering and Photonic Technology (OEPT), Jul. 2009.
- [18] 春山真一郎, “可視光通信の標準化,” 信学誌, vol. 101, no. 1, pp. 38–43, 2018年1月.
- [19] N. B. M. Nawawi, M. S. Anuar, M. N. Junita, S. R. Abdullah, “Performance Evaluation of VLC System Using New Modulation Approach,” Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, vol. 8, no. 2, pp. 630–636, Jun. 2019.
- [20] S. Louvros, F. David, “VLC technology for indoor LTE Planning,” Springer, System-Level Design Methodologies for Telecommunication, pp. 21–41, 2014.

- [21] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” IEEE Std 802.11, Nov. 1997.
- [22] LAN/MAN Standards Committee, “IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks Specific Requirements. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS).” IEEE Standards Association, vol. 802, Sep. 2006.
- [23] M. Jain, J. Choi, T. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, S. Katti, P. Sinha, “Practical, Real-time, Full Duplex Wireless,” Proceedings of The 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Sep. 2011.
- [24] T. Komine, M. Nakagawa, “Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System Using LED Lights,” IEEE transactions on Consumer Electronics, vol. 50, no. 1, pp. 100–107, Jun. 2004.
- [25] 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, Mar. 2000.
- [26] D. Malone, K. Duffy, D. Leith, “Modeling the 802.11 Distributed Coordination Function in Nonsaturated Heterogeneous Conditions,” IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 15, no. 1, pp. 159–172, Feb. 2007.

- [27] Q. Zhao, D. H. K. Tsang, 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, Apr. 2009.
- [28] P. Park, P. Di Marco, P. Soldati, C. Fischione, K. H. Johansson, “A Generalized Markov Chain Model for Effective Analysis of Slotted IEEE 802.15.4,” *Proceedings of The 2009 IEEE 6th International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems*, Oct. 2009.
- [29] C. Y. Jung, H. Y. Hwang, D. K. Sung, G. U. Hwang, “Enhanced Markov Chain Model and Throughput Analysis of the Slotted CSMA/CA for IEEE 802.15.4 under Unsaturated Traffic Conditions,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 473–478, Apr. 2008.
- [30] P. Shams, M. Erol-Kantarci, M. Uysal, “MAC Layer Performance of the IEEE 802.15.7 Visible Light Communication Standard,” *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 27, no. 5, pp. 662–674, Jan. 2016.
- [31] V. Van Huynh, Y. M. Jang, “Priority MAC Based on Multi-Parameter for IEEE 802.15.7 VLC,” *Proceedings of The International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Sep. 2011.
- [32] A. Musa, M. D. Baba, H. M. A. H. Mansor, “Performance Analysis of the IEEE 802.15.7 CSMA/CA Algorithm Based on Discrete Time Markov Chain (DTMC),” *Proceedings of The 2013 IEEE 11th Malaysia International Conference on Communications (MICC)*, Nov. 2013.

- [33] S. K. Nobar, K. A. Mehr, J. M. Niya, “A Comprehensive Performance Analysis of IEEE 802.15.7 CSMA/CA Mechanism for Saturated Traffic,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, no. 2, pp. 62–73, Jan. 2015.
- [34] M. Bhutani, B. Lall, A. Dixit, “MAC Layer Performance Modelling for IEEE 802.15.7 Based on Discrete-Time Markov Chain,” *IET Communications*, vol. 15, no. 14, pp. 1883–1896, Aug. 2021.

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, 研究室の整備等で支えて下さった山本 好弘技術職員, 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4年 澤 優太

研究業績

- 澤 優太, 眞田 耕輔, 羽多野 裕之, 森 香津夫, “FD-VLC ネットワークにおけるパケット破棄を抑制するバックオフ手法のマルコフ連鎖モデルを用いた性能解析,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-5-137, pp. 425, 2020年3月.
- 澤 優太, 眞田 耕輔, 羽多野 裕之, 森 香津夫, “FD-VLC ネットワークにおけるパケット破棄を抑制する改良型バックオフ手法の非飽和トラヒック状態における性能解析,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-11-30, pp. 125, 2020年9月.
- Yuta SAWA, Kosuke SANADA, Hiroyuki HATANO, Kazuo MORI, “Improved Backoff Scheme for Full Duplex CSMA/CA in VLC Networks,” Proceedings of The 10th International Symposium for Sustainability by Engineering at Mie University (Research Area C), Sep. 2020.
- Yuta SAWA, Kosuke SANADA, Hiroyuki HATANO, Kazuo MORI, “Performance Analysis of Improved Backoff Scheme for Full Duplex CSMA/CA in VLC Networks,” Proceedings of The 2020 23rd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC2020), pp.192-197, Okayama, Japan, Oct. 2020. DOI: 10.1109/WPMC50192.2020.9309470
- Yuta SAWA, Kosuke SANADA, Hiroyuki HATANO, Kazuo MORI, “Improved Backoff Scheme for Full Duplex CSMA/CA in VLC Networks,” Proceedings of The 10th International Symposium for Sustainability by Engineering at Mie University (Research Area C), Sep. 2020.

- Yuta SAWA, Kosuke SANADA, Hiroyuki HATANO, Kazuo MORI, “An Improved Backoff Scheme and its Performance Analysis for Full Duplex MAC Protocol in VLC Networks,” MDPI Sensors, vol. 21, iss. 24, no. 8263, Dec. 2021. DOI: 10.3390/s21248263