

無線全二重通信ネットワークにおける理論解析手法の開発

代表研究者 眞田 耕輔 三重大学大学院 工学研究科 助教

1 はじめに

現在の無線通信ネットワークは、半二重通信であり同じチャネル上でデータ送信と受信を同時に行うことができないのが一般的であった。しかし、近年の干渉除去技術の発展により、同じチャネル上でのデータ送信と受信を同時に行う「無線全二重通信」が可能となりつつある。無線全二重通信では、送信と受信を同時に行うことができることから、1対1の通信では単純に通信容量をこれまでの2倍にすることができる。そのため、無線全二重通信の研究は、これまでの無線通信の常識を覆すブレークスルーを創出するとして、多くの研究者に注目されている。

しかし、複数の端末が混在するネットワークに無線全二重通信を適用させたとき、周囲の通信状況を配慮したうえで、端末間の送受信のタイミングを端末間で合わせる必要がある。また、ネットワークにおいてどのような干渉が端末間に生じるかは十分に明らかになっておらず、これが無線全二重のポテンシャルを最大限に引き出すことの妨げとなっている。複数の端末が結合するネットワークにおいて、その性能を引き出すには、適切な MAC プロトコルを設計する必要がある。これまでの無線通信プロトコルは半二重を前提として、研究開発が進められてきており、同じチャネル上で端末が送受信を同時に行う「無線全二重通信における本質的な動作」をする端末がネットワークとして結合したときの「ネットワーク全体」に及ぼす影響に関する知見はこれまで全く得られていない。最適なプロトコルを設計するにおいて、まずこの知見を得ることが先決である。

本研究では、無線全二重通信ネットワークにおける理論解析の基礎理論の導出を目指す。ネットワークを構成する「個」の動作がネットワーク「全体」の振舞いに及ぼす影響をボトムアップ的にモデル化することにより、集中制御型および自律分散型ネットワークの両方に通用する無線全二重通信ネットワークにおける統一的理論解析技術の基礎理論を導出する。そのため、本研究では、常に無線全二重通信を用いた「個」の動作からネットワーク「全体」を表現することを強く意識し、下位層のモデルから上位層のモデルを構築するボトムアップ的な解析アプローチを取るという方針で研究を進めていく。

2 無線全二重通信とその MAC プロトコル

図 1 に無線全二重通信における基本的な伝送モードとして、それぞれ双方向全二重通信モード(図 1(a))、片方向全二重通信モード(図 1(b))を示す[2]。双方向全二重通信モードでは2つの端末は互いのフレームの送受信を同時に行う。一方、片方向全二重通信モードでは、3 端末間で無線全二重通信を行う。片方向全二重通信では、3 端末のうち両端の端末同士は隠れ端末の関係でない場合、データ受信時に干渉を除去しきれず全二重通信が失敗する。これをユーザ間干渉と呼ぶ[1]。全ての通信を双方向全二重通信で行えば、このユーザ間干渉の影響を回避できるが、ネットワークにおける全ての端末が全二重通信の機能を有している必要がある。そのため、片方向全二重通信モードは半二重通信の機能のみを有している端末がネットワークに存在しても運用することが可能である。これらの伝送モードの特徴を考慮したうえで、ネットワークにおいて適切に使い分けをするためには適切な MAC プロトコル設計が必要となる。



図 1 全二重通信の基本的な伝送モード (a) 双方向全二重通信モード (b) 片方向全二重通信モード

これまで提案されている FD MAC は、全二重通信の送受信タイミングを端末間で合わせるという点で、同期型と非同期型の 2 種類に分類することができる。同期型 FDMAC では、全二重通信を行う前に、データ送信前

に Request to Send/ Clear to Send (RTS/CTS) フレームなどの制御フレームを交換することにより、全二重通信の送受信タイミングを端末間で合わせる。一方、非同期型 FD MAC は、制御フレームは用いずに送信データのヘッダ部に無線全二重通信に必要な情報を含めることにより、全二重通信の送受信タイミングを端末間で合わせる。どちらの方式も、CSMA/CA 方式に基づきチャンネルアクセスを行うことで、自律的に全二重通信の送受信タイミングを調整している [2]。

図 2(b) に非同期型 FD MAC プロトコルのチャンネルアクセス例を示す。図 2(a) のような 1 台の基地局 (AP) と 2 台の端末 (STA) のスター型 WLAN を想定し、ダウンリンクとアップリンクのフローがある。CSMA/CA 方式の非同期型 FD MAC では、送信開始前にバックオフの待機時間が $[0, CW_{min})$ の値の範囲の中からランダムに決められる (図 2(b) の時刻 (a))。図 2(b) の例では $CW_{min} = 16$ としている。図 2(b) の時刻 (b) において、STA1 が送信権を獲得し AP 宛にデータ送信を行う。非同期型 FD MAC では、データフレームのうちヘッダ部に全二重通信の開始を通知する情報が含まれる [1]。送信データのヘッダ部を受信した AP は、自身のバッファの先頭のフレームの宛先がプライマリ送信を行った STA 0 宛であるとき、AP はセカンダリ送信を行う (図 2(b) の時刻 (c))。全二重通信の一方の送信が先に終了した場合は、もう一方のフレーム送信が終了するまでビジートーンを送信し、周囲に送信中であることを通知することで、周囲の端末の送信開始を抑制する。送信が終了すると、ACK フレームを全二重通信で送信する。送信が成功すると、次のフレーム送信のためのバックオフの待機時間は、 $[0, CW_{min})$ の値の範囲の中からランダムに決まる。一度に 2 台以上の端末が送信を開始した場合は通信の衝突となり、その送信は失敗となる。再送信の衝突を回避するためにバックオフの待機時間は $[0, 2CW_{min})$ の値の範囲の中からランダムに決められる (バイナリバックオフ)。FD MAC プロトコルと半二重通信のプロトコルとの決定的な違いは、FD MAC ではバックオフタイマが 0 でなくとも、セカンダリ送信に移行することができるという点である。これは、同期型 FD MAC においても共通しており、FD MAC の本質的な動作であると言える。

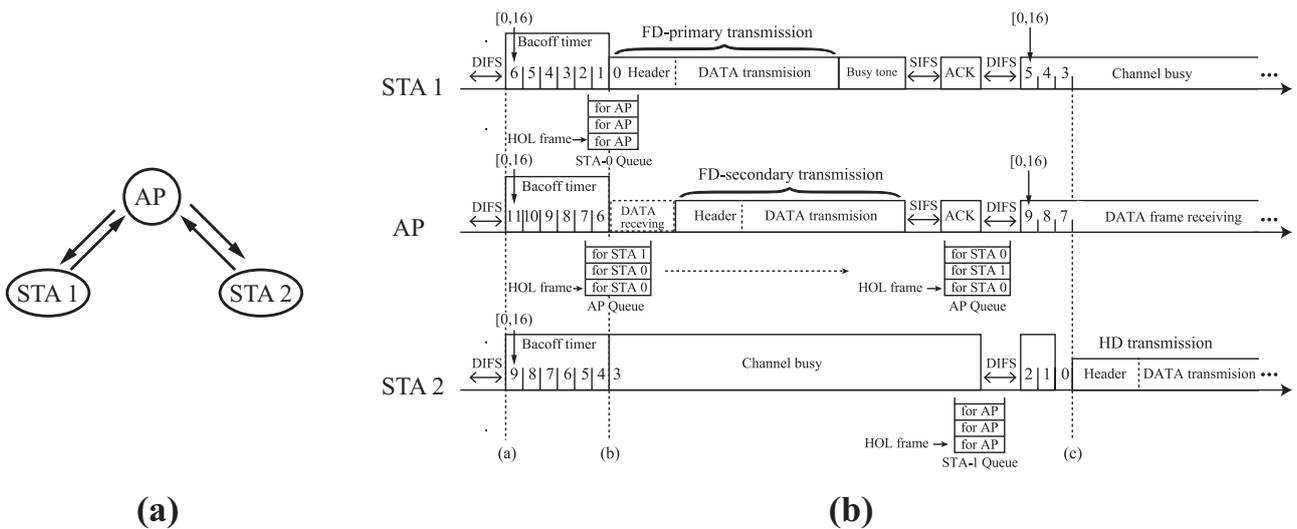


図 2 (a) スター型無線 LAN と (b) 非同期型 FD MAC におけるチャンネルアクセス例

3 無線全二重通信ネットワークにおける理論解析手法の開発

本研究では、無線全二重通信ネットワークにおける理論解析の基礎理論の導出を目指す。ネットワークを構成する「個」の動作がネットワーク「全体」の振舞いに及ぼす影響をボトムアップ的にモデル化することにより、集中制御型および自律分散型ネットワークの両方に通用する無線全二重通信ネットワークにおける統一的理論解析技術の基礎理論を導出する。そのため、本研究では、常に無線全二重通信を用いた「個」の動作からネットワーク「全体」を表現することを強く意識し、下位層のモデルから上位層のモデルを構築するボトムアップ的な解析アプローチを取るという方針で研究を進めていく。3-1 章では、まず、2 章で説明した FD MAC の動作のモデル化を行うことで「個」の動作を詳細に表現する。得られた MAC 層のモデルを、スター型の WLAN を解析対象として評価する。また、3-2 章では、「個」のモデルをネットワークとして結合させることにより、ネットワーク層のモデル化を行う。解析対象を直線状無線マルチホップネットワークとし

て、解析モデルの評価を行う。

3-1 MAC 層のモデル化

本章では、2章で説明したFD MACの動作のモデル化を行うことで、無線全二重通信ネットワークにおける「個」の動作を詳細に表現する。図2にFD MACの動作を考慮したマルコフ連鎖モデルを示す。マルコフ連鎖モデルを用いたWLANの性能解析はBianchiの解析モデル[3]を皮切りに、これまで多くのモデルが提案されている[4],[5]。文献[5]では、Bianchiの解析モデルを基に、FD MACの動作を考慮したマルコフ連鎖モデルが提案されている。しかし、文献[5]の解析モデルでは、データ送信失敗したあとにCWの値を倍にする指数バックオフ(Binary Exponential Backoff: BEB)が考慮されていない。そのため、衝突が頻繁に発生するネットワークに適応することができない。本章では、MAC層の詳細なモデルを得るために、FD MACとBEBを同時に考慮可能なモデルを提案する。

本章の解析では、 n 台のSTAと1台APで構成されるWLANを解析対象とする。それぞれのSTA, APは全二重通信の機能を有し、2章で紹介したFD MACに従い動作する。本解析における仮定を以下に示す：

1. 飽和状態のネットワークを想定し、全ての端末は常にキューに一個以上の送信フレームを持つ。
2. 全てのSTAはAP宛に固定ペイロード長 P bytesのUDPフレームを生成する。APは各STA宛に固定ペイロード長 P bytesのUDPフレームを一様に生成する。
3. APのキューの先頭のフレームの宛先が、送信開始した端末と一致したとき、APはセカンダリ送信へ移行する[5]。
4. 送信失敗はMAC層における通信の衝突によってのみ起こるとする。つまり、物理層における送信失敗および全二重通信の干渉除去の失敗は考慮しない。
5. 全ての端末はお互いの送信を検知可能とし、隠れ端末の関係にある端末はないとする。

3-1-1. 送信確率の導出

図3にBEBとFD MACの動作を考慮したマルコフ連鎖モデルを示す。

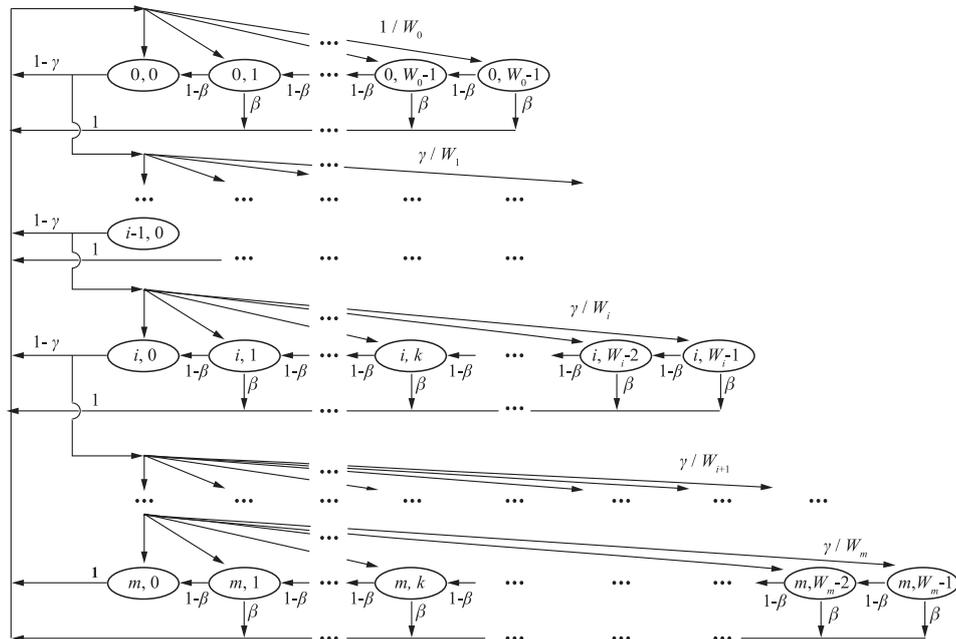


図3 FD MACの動作と指数バックオフの動作を考慮したマルコフ連鎖モデル

図3において、 β はセカンダリ送信移行確率、 γ はフレーム衝突率である。再送回数 i 回目(バックオフステージ i)におけるコンテンションウィンドウの値を $W_i = \min(2^i CW_{min}, CW_{max})$ と表す。また、 CW_{max} はコンテンションウィンドウの最大値、 m は最大再送回数である。マルコフモデルにおけるそれぞれの状態は、バックオフステージが i 、バックオフタイムが k である状態を示している[3]。FD MACでは、バックオフタイムが0でなくともセカンダリ送信へ移行可能である。セカンダリ送信後は、次のフレーム送信のために新たなバックオフタイムは $[0, CW_{min})$ の中から選ばれる。図3において、セカンダリ送信への移行に関する状態

遷移確率は,

$$P[i, k|i, k+1] = 1 - \beta,$$

$$P[0, k|i, l] = \frac{\beta}{w_0},$$

である. また, 図2における衝突の際の指数バックオフに関する状態遷移確率は,

$$P[0, k|i, 0] = \frac{1-\gamma}{w_0},$$

$$P[i, k|i-1, 0] = \frac{\gamma}{w_i},$$

$$P[0, k|m, 0] = \frac{1}{w_0},$$

である. これらの状態遷移をもつマルコフ連鎖モデルにおける各状態の定常状態確率は,

$$b_{i,k} = \frac{\beta \gamma^i \prod_{j=1}^i \omega_j}{\frac{1}{\omega_0} - (1 - \gamma + \beta) [1 + \sum_{i=1}^{m-1} (\gamma^i \prod_{j=1}^i \omega_j)] - \gamma^m \prod_{j=1}^m \omega_j}$$

として得る. ただし,

$$\omega_j = \frac{1 - (1 - \beta)^{W_j}}{W_j \beta}$$

である. 導出過程の詳細は[発表資料-1]に譲る. したがって, 端末のデータ送信確率は

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0}$$

として導出できる. 上式において, $\beta \rightarrow 0$ することにより, 半二重送信のみを考慮した端末の送信確率が得られる. これは Bianchi の理論解析モデルから得られる送信確率と一致する.

本章では, アップリンクとダウンリンクのフローが存在するスター型 WLAN を解析対象としているため, AP と STA とでセカンダリ送信移行確率が異なる. AP と STA に関する未知数を区別するために, 3章の以降の説明では, STA と AP のプライマリ送信確率をそれぞれ τ_{sta} , τ_{ap} とする. 同様に STA および AP のプライマリ送信の衝突率をそれぞれ γ_{sta} , γ_{ap} , STA および AP のセカンダリ送信移行確率をそれぞれ β_{sta} , β_{ap} とする.

3-1-2. セカンダリ送信移行確率の導出

AP は STA のアップリンクのプライマリ送信に対して, セカンダリ送信を行う. ネットワークにおいて1台の STA がプライマリ送信を行っている確率は $n\tau_{sta}(1 - \tau_{sta})^{n-1}$ と表せる. 仮定(2)より, AP は各端末宛のフレームを等確率で生成するため, AP の先頭のフレーム宛先がプライマリ送信を行った STA と一致する確率は $\frac{1}{n}$ である. したがって, AP のセカンダリ送信移行確率は,

$$\beta_{ap} = \frac{1}{n} \cdot n\tau_{sta}(1 - \tau_{sta})^{n-1} = \tau_{sta}(1 - \tau_{sta})^{n-1}$$

と表せる. STA も AP のダウンリンクのプライマリ送信に対して, セカンダリ送信を行う. ネットワークにおいて AP がプライマリ送信を行っている確率は $\tau_{ap}(1 - \tau_{sta})^n$ と表せる. n 台の STA のうち, ある STA と AP のフレームの宛先が一致する確率は $\frac{1}{n}$ であるので, STA のセカンダリ送信移行確率は,

$$\beta_{sta} = \frac{1}{n} \cdot n\tau_{ap}(1 - \tau_{sta})^{n-1} = \tau_{ap}(1 - \tau_{sta})^{n-1}$$

と表せる.

3-1-3. 衝突率の導出

2 台以上の端末が同時にプライマリ送信を開始したとき, フレームの衝突となる. したがって, AP および STA の衝突率はそれぞれ

$$\gamma_{ap} = 1 - \tau_{sta}(1 - \tau_{sta})^n,$$

および

$$\gamma_{sta} = 1 - (1 - \tau_{sta})^{n-1}(1 - \tau_{ap})$$

と表せる. 6 つの未知数 τ_{ap} , τ_{sta} , β_{ap} , β_{sta} , γ_{ap} および γ_{sta} に関する代数方程式を数値的に解くことにより, 未知数の値を得ることができる.

3-1-3. 飽和スループットの導出

得られた τ_{ap} , τ_{sta} , β_{ap} , β_{sta} , γ_{ap} および γ_{sta} から, 飽和スループットを導出する. Bianchi の解析モデル [3]における飽和スループットの定義は,

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

である. 上式における分母は, 無線チャネルがビジーのためバックオフタイムが停止した期間も考慮した平均スロット長を示し, 分子はその平均スロット長のうちで通信が成功したデータペイロードの期待値を示している.

ネットワークにおいて, 少なくとも1台以上の端末が送信を行っている確率は,

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau_{ap})(1 - \tau_{sta})^n$$

と表せる. ネットワークにおいて全二重通信が行われている確率を導出する. AP がプライマリ送信を行うと, STA と必ずセカンダリ送信を行う. 一方, STA がプライマリ送信を行った場合, 本解析の仮定では, AP のバッファの先頭のフレームの宛先がそのプライマリ送信を行った STA と一致した場合, 全二重通信が行われる. AP の先頭のフレーム宛先がプライマリ送信を行った STA と一致する確率が $\frac{1}{n}$ であることから, 全二重

通信が行われている確率は

$$P_{s,FD} = \frac{\tau_{ap}(1 - \tau_{sta})^n + \tau_{sta}(1 - \tau_{ap})(1 - \tau_{sta})^{n-1}}{P_{tr}}$$

と表せる. また, STA がバックオフタイムを0にしてデータ送信を行ったが, AP のバッファの先頭のフレームの宛先がそのデータ送信を行った STA と一致しない場合は, 半二重通信が行われる. したがって, 半二重通信が行われる確率は,

$$P_{s,HD} = \frac{(n-1)\tau_{sta}(1 - \tau_{ap})(1 - \tau_{sta})^{n-1}}{P_{tr}}$$

と表せる. 以上より, 全二重通信が行われたときは, 1 データフレームの送信時間のうちに2倍のデータペイロードの送信成功することを考慮して, ネットワークの飽和スループットは,

$$S = \frac{P_{tr}(P_{s,FD} \cdot 2P + P_{s,HD} \cdot P)}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr}P_{s,FD}(T_s + \text{HEADER}) + P_{tr}P_{s,HD}T_s + P_{tr}(1 - P_{s,FD} - P_{s,HD})T_c}$$

と表せる. ここで, $T_s = \text{DIFS} + \text{DATA} + \text{SIFS} + \text{ACK}$, $T_c = \text{DIFS} + \text{DATA}$ である. ここで, DIFS , SIFS , および ACK はそれぞれ DIFS, SIFS による待機時間, ACK フレーム送信時間である. また, HEADER および DATA はそれぞれフレーム送信におけるヘッダ部の送信時間およびペイロード部の送信時間である [5].

3-1-4, 解析モデルの評価

本解析モデルの妥当性をシミュレーション結果との比較により示す. ネットワークシミュレータとして, 著者らによって作成されたネットワークシミュレータに FD MAC の動作の実装を行った. オリジナルネットワークシミュレータの妥当性は ns3 との比較を行い, 同様な結果を得ることを確認している. シミュレーションで用いたパラメータは IEEE 802.11a に基づくものとした.

図 4 に端末数 11 台におけるペイロードサイズに対する飽和スループットを示す. バイナリバックオフを考慮しない解析結果も同様に示す. 図 4 より, $CW_{min} = 256$ のとき, バイナリバックオフを考慮しない解析結果はシミュレーション結果と一致しているが, $CW_{min} = 16$ のときに誤差がある. $CW_{min} = 256$ のときのように CW の値が比較的に大きいとき, プライマリ送信の送信確率が低いことから衝突率は低い. そのため, バックオフによる待機時間の増加が端末数 11 台ではほとんど生じないと考えられる. CW_{min} が小さいときは, プライマリ送信の送信確率が高くなることから, 衝突率が高くなる. したがって, バックオフによる待機時間の増加は無視できない. 図 4 より, 任意の CW_{min} において本解析モデルによる解析結果とシミュレーション結果が一致している. これはバックオフによる待機時間の増加を考慮されているためである. 以上より, 解析モデルの妥当性が確認できる.

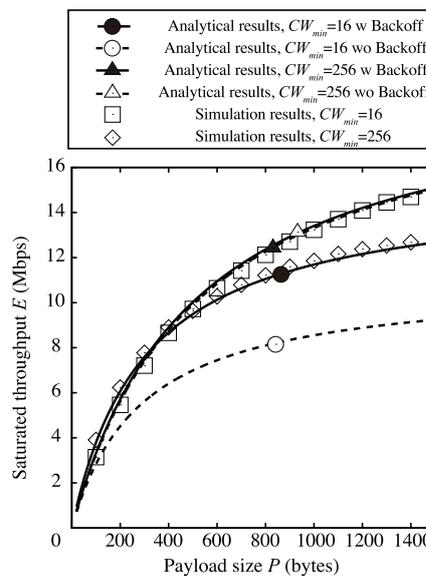


図 4 STA 11 台のときのペイロードサイズに対する飽和スループット

図 5 (a)および(b)に $CW_{min} = 16$ および $CW_{min} = 256$ のとき STA15 台の WLAN のペイロードサイズに対する飽和スループットをそれぞれ示す. 図 5 には, 半二重通信 WLAN における飽和スループットも示している. 図 5 より, STA15 台では, $CW_{min} = 256$ のときの方が, 無線全二重通信によるスループットの向上がより得ら

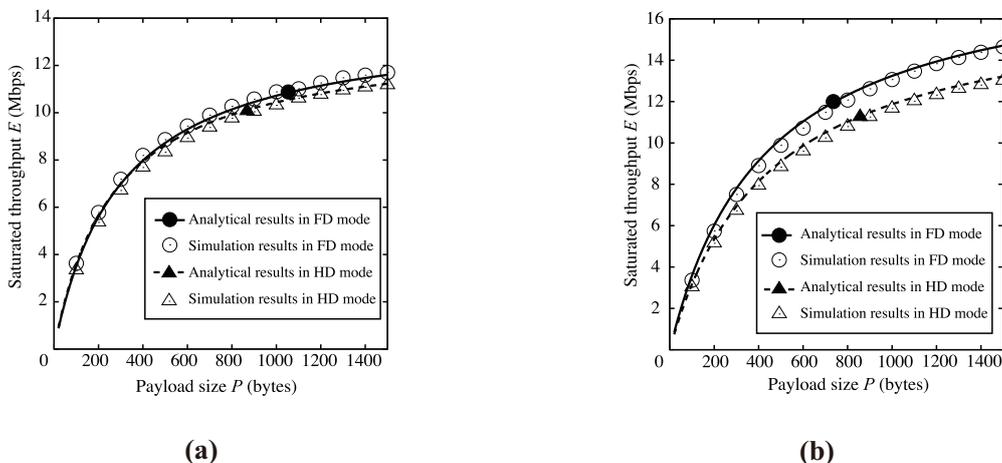


図 5 STA 15 台のときのペイロードサイズに対する飽和スループット: (a) $CW_{min} = 256$, (b) $CW_{min} = 16$

れている。シミュレーションの設定および解析の仮定として、AP はキューの先頭のフレームの宛先とプライマリ送信の送信元が一致したときに AP はセカンダリ送信に移行するとしている。そのため、 $CW_{min} = 16$ のようにプライマリ送信確率が高くても、STA の台数が増えるにともない、AP のセカンダリ送信移行確率が小さくなり、半二重通信の割合が多くなったと言える。

図 6 に、 $CW_{min} = 16, 256$ における STA 台数に対する飽和スループットを示す。図 6 において、実線は理論解析結果、プロットはシミュレーション結果である。さらに、AP のキューの先頭のフレームの宛先がプライマリ送信端末と異なる場合、キューの操作(CQ; Change Queueing)を行い、全二重通信を行う動作を考慮した場合のシミュレーションおよび理論解析結果も示す。このキューの操作を考慮した場合、本解析の仮定では、全ての端末の送信は無線全二重通信で行われるため、 $P_{HD}=0$ および

$$P_{s,FD} = \frac{\tau_{ap}(1 - \tau_{sta})^n + n\tau_{sta}(1 - \tau_{ap})(1 - \tau_{sta})^{n-1}}{P_{tr}}$$

として、飽和スループットを求めた。キューの操作を行うことで、STA の台数が増えても全二重通信の機会をより増やすことができ、スループットの向上が得られることが確認できる。しかし、端末間の送信機会の公平性の面といった観点から、必ずしも性能の向上が得られるとは限らず、このネットワークの動作をさらに考察するために、非飽和状態のネットワークの動作とキューの動きが考慮する必要がある。

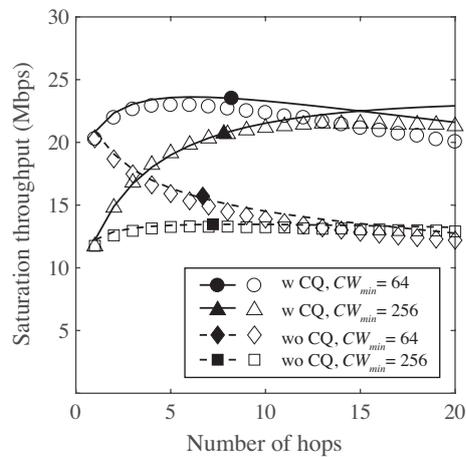


図 6 $CW_{min} = 16, 256$ における STA 台数に対する飽和スループット

3-2 ネットワーク層のモデル化

本章では、「個」のモデルをネットワークとして結合させることにより、ネットワーク層のモデル化を行う。始点から終点までの動作のモデル化するため、解析対象を単純な直線状無線マルチホップネットワークとする。本章の解析方針として、無線半二重通信マルチホップネットワークにおけるエアタイムを用いた解析手法と FD MAC を考慮したマルコフ連鎖モデルに基づく解析手法を統合することにより、ネットワーク層のモデル化を実現する。

図 7 に本解析で考慮する H ホップの直線状マルチホップネットワークを示す。

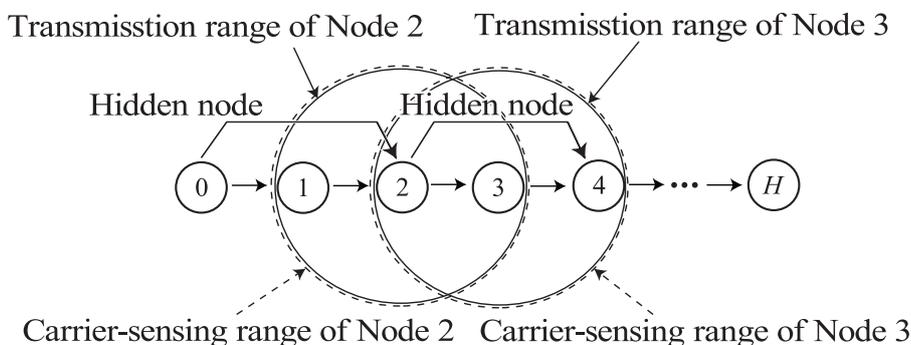


図 7 H ホップネットワーク

本解析における仮定を以下に示す。

1. 端末 0 は端末 H 宛の UDP データ (ペイロードサイズ P bytes) を生成し中継端末 i ($i = 1, 2 \dots H - 1$) は自身でデータフレームを生成せず端末 $i - 1$ から受信したフレームを端末 $i + 1$ へ中継する。
2. 全ての通信リンクは理想状態であるとし、送信の失敗はフレームの衝突によってのみ発生する。
3. 全ての端末は 1 ホップ先までのデータを送信可能とする。また 1 ホップ先の端末の送信をキャリアセンス可能とする [10] [11]。したがって、端末 i と端末 $i + 2$ は互いに隠れ端末の関係にある。
4. 端末 $i + 1$ が端末 i のプライマリ送信を受信したとき、自信のバッファに送信フレームが存在ある場合に端末 $i + 1$ セカンダリ送信を行う。
5. バックオフタイマーは常に $[0, CW_{min} - 1]$ の範囲から選択するとし指数バックオフの動作は考慮しない [5]。

本解析では、バックオフタイマーを 0 にして送信権を得た送信回数と、セカンダリ送信によって送信権を獲得した送信回数の比を FD MAC を考慮したマルコフ連鎖モデルより端末ごとに導出する。それを用いて FD MAC を考慮したエアタイムとして、全二重通信のプライマリ送信、セカンダリ送信および半二重通信の送信エアタイムをそれぞれ端末ごとに導出する。これらを用いて、端末ごとのキャリアセンスエアタイムおよび衝突率を導出する。最後に、端末ごとの解析表現をネットワークとして関連付けを行うことで、ネットワーク層のモデル化を行う。

3-2-1, エアタイムを用いた解析手法

マルチホップネットワークにおける解析手法の一つとしてエアタイムを用いた解析手法が提案されている [6]。送信エアタイムは、十分に長い時間 $[0, Time]$ を考慮したときの端末のデータフレーム送信が行われた時間の比として表せる。したがって、端末 i の送信エアタイムは

$$X_i = \lim_{Time \rightarrow \infty} \frac{S_i}{Time}$$

と定義される。ここで、 S_i には、端末 i における DIFS および SIFS 期間、DATA フレームおよび ACK フレーム送信期間が含まれる。このように定義された送信エアタイムを用いることによって、各端末のチャネルアクセス状態や隠れ端末による衝突の影響を表現することができ、端末ごとに異なる MAC 層の動作を考慮することができる。文献 [8] ではエアタイムと待ち行列理論を考慮することにより、非飽和状態の端末の動作を表現する「フレーム保持確率」の概念を提案している。文献 [9] ではエアタイムと Bianchi のマルコフ連鎖モデル [3] を統合させた解析モデルを提案している。

3-2-1, FD MAC を考慮した送信エアタイムの導出

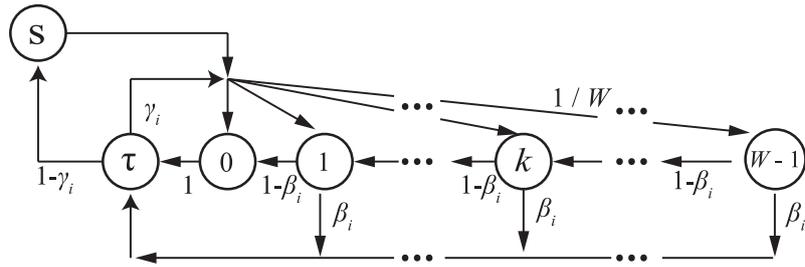


図 8 FD MAC を考慮した端末*i*マルコフ連鎖モデル(指数バックオフなし)

図 8 に FD MAC の動作を考慮した端末*i*のマルコフ連鎖モデルを示す. 図 3 と同様にこのモデルにおいて状態*k*はバックオフタイマーが*k*である状態を示す. 本解析フェーズでは, まず FD MAC の動作を考慮したマルコフ連鎖モデルとエアタイムの解析理論を統合させることを目標とした. そのため, 簡単化のため指数バックオフの動作を本フェーズでは無視した. FD MAC の動作を考慮したマルコフ連鎖モデルとエアタイムの解析理論を統合し, さらに図 3 のマルコフ連鎖モデルを適用させることにより, 指数バックオフの動作も同時に考慮可能となる.

図 8 において, 状態 τ は送信を行なっている状態を示す. 状態*S*は端末のフレーム送信に成功し次のフレーム送信のために新たなバックオフタイマーを選択する状態である. 尚, β_i は端末*i*のセカンダリ送信移行確率である. このモデルにおけるタイマーが*k*のときの定常状態確率は,

$$\pi_k = \frac{\frac{1 - (1 - \beta_i)^{W-k}}{W\beta_i}}{1 + \sum_{j=0}^{W-1} \frac{1 - (1 - \beta_i)^{W-j}}{W\beta_i} + 1 - \gamma_i}$$

として導出できる. 導出仮定の詳細は[発表資料-2]に委ねるとする. したがって, 端末*i*の全送信回数のうちプライマリ送信回数の比率は, 状態 τ と状態 0 の定常状態確率の比に等しいと仮定すると,

$$\Delta_i = \frac{\pi_0}{\pi_\tau} = \frac{1 - (1 - \beta_i)^W}{W\beta_i}$$

と表せる. この比を用いて, 端末*i*のプライマリ送信およびセカンダリ送信エアタイムはそれぞれ,

$$X_{PR_i} = \Delta_i X_i,$$

および,

$$X_{SC_i} = (1 - \Delta_i) X_i$$

として表せる. また, 仮定 4 より, 全二重通信マルチホップネットワークでは, 端末*i*のプライマリ送信の時間と端末*i* + 1のセカンダリ送信の時間は等しいと仮定すると, 端末*i*の半二重送信の送信エアタイムは,

$$X_{HD_i} = \Delta_i X_i - X_{SC_{i+1}}$$

として表現できる. $\Delta_i = 1$ のとき, すなわちセカンダリ送信が行われない場合, $X_{HD_i} = X_{PR_i} = X_i$ となり, 従来エアタイムを用いた解析の送信エアタイムの定義と一致する. 端末*i*のプライマリ送信を行なっているとき, 端末*i* + 1がセカンダリ送信端末として送信を開始する. このとき, 端末*i*の隠れ端末である端末*i* + 2はセカンダリ送信端末の送信を検知することにより, 端末*i*がプライマリ送信を行なっている最中は送信を開始しない. そのため, プライマリ送信は隠れ端末による衝突の影響を受けないと仮定すると, 端末*i*のスループットは, 衝突率 γ_i を用いて

$$E_i = X_{HD_i} (1 - \gamma_i) \frac{P}{T} + (X_{PR_i} - X_{HD_i}) \frac{P}{T + HEADER} + X_{SC_i} (1 - \gamma_i) \frac{P}{T}$$

と表せる. ここで, $T = DIFS + DATA + SIFS + ACK$ であり, それぞれ ACK, フレーム送信時間, DIFS, SIFS 期間である. $HEADER$ はデータ送信におけるヘッダ部の送信時間である.

3-2-2, キャリアセンスエアタイムの導出

端末*i*のキャリアセンスエアタイムはそのキャリアセンス範囲内にある端末の送信エアタイムの和として得る. 仮定4より, 端末*i-1*のプライマリ送信中は端末*i*がセカンダリ送信を行なっている. 同様に, 端末*i*がプライマリ送信中は端末*i+1*がセカンダリ送信を行なう. したがって, 端末*i*のキャリアセンスエアタイムは端末*i*のキャリアセンス範囲にある端末の送信エアタイムの和から端末*i-1*のプライマリ送信エアタイムと端末*i+1*のセカンダリ送信エアタイムを除くことによって導出される. 端末*i-1*とその隠れ端末である端末*i+1*の重複した通信時間を考慮して, 端末*i*のキャリアセンスエアタイムは,

$$Y_i = X_{SC_{i-1}} + X_{HD_{i-1}} + X_{PR_{i+1}} - \frac{(X_{SC_{i-1}} + X_{HD_{i-1}})X_{PR_{i+1}}}{1 - X_i}$$

として得る.

3-2-3, フレーム保持確率の導出

チャネルアイドル状態において端末*i*が少なくとも1つ以上のフレームを保持している確率をフレーム保持確率と定義する[8]. フレーム保持確率はバックオフタイマーのカウント時間とチャネルアイドルエアタイムの比として導出される. 端末*i*は送信状態でもキャリアセンス状態でもないとき, チャネルアイドル状態である. したがって, 端末*i*のチャネルアイドルエアタイムは,

$$Z_i = 1 - X_i - Y_i$$

と表せる. 仮定1より端末*i*のフレーム到着率は

$$\lambda_i = \begin{cases} \frac{0}{P}, & \text{for } i = 0 \\ \frac{E_{i-1}}{P}, & \text{for } i = 1, 2, \dots, H-1 \end{cases}$$

と表せる. ここで, 0 はネットワークのオフロードを示す. 端末*i*の1フレーム送信成功までの平均バックオフカウン数を U_i と定義する. U_i は図8のFD MACを考慮したマルコフ連鎖モデルにおいて, 状態*S*への平均再起時間に等しい. 平均再起時間は, 定常状態確率の逆数として導出できるので,

$$U_i = \frac{1}{\pi_{S_i}}$$

である. したがって, フレーム保持確率は,

$$q_i = \min\left(\frac{\lambda_i U_i \sigma}{Z_i}, 1\right)$$

と表せる. ここで, σ はシステムのスロットタイムである. q_i が1であるとき端末*i*は常に1つ以上フレームを保持していることを示し, その端末がネットワーク内のボトルネックとなっていることを示す. つまり, ネットワークの最大スループットはボトルネックとなっている端末のフレーム保持確率が1となった時のオフロードである[8].

3-2-4, 衝突率の導出

直線状マルチホップネットワークでは隠れ端末による衝突は, (1) protocol hidden-node collisionと(2) physical hidden node collisionの2種類が存在する[7]. (1) protocol hidden-node collisionは端末*i+2*がデータフレーム送信中に端末*i*が送信を開始してしまうことによって発生する衝突である. 文献[7]より protocol hidden-node collisionによる端末*i*のフレーム衝突率は,

$$\gamma_i^{(1)} = \frac{aX_{PR_{i+2}}}{1 - X_{i+1}}$$

と表せる. ここで, $a = DATA/(DIFS + DATA + SIFS + ACK)$ である. (2) physical hidden node collisionの衝突は端末*i*がデータフレーム送信中に端末*i+2*が送信を開始してしまうことにより発生する衝突である. 端末*i*が送信を開始した時点で, 端末*i+2*のバックオフタイマーの値が $d = DATA/\sigma$ より小さい場合に発生する[9]. したがって, 端末*i*における physical hidden node collisionによるフレーム衝突率は,

$$\gamma_i^{(2)} = \frac{q_{i+2} Z_{i+2} \sum_{k=0}^d \pi_k}{1 - X_{i+1}}$$

と表せる. これらの衝突は独立な事象であるため, 端末*i*の衝突率は, $\gamma_i = \gamma_i^{(1)} + \gamma_i^{(2)}$ と表せる.

3-2-5, 全二重通信マルチホップネットワークにおけるフロー制限

直線状マルチホップネットワークでは中継端末は端末0が発生したフレームを中継していく。ネットワークのオフロードを O と定義すると、フローにおける各端末のスループットは等しいことから、

$$O = E_0 = E_1 = \dots = E_{H-1}$$

を満たす(フロー制限[8])。この条件式より、各端末のMAC層の動作をネットワークフローとして関連付けることができる。ネットワークオフロード O を与えることにより、端末ごとの X_i , q_i , β_i , γ_i に関する式を数値的に解くことことで、これらの未知数の値を得ることができる。

3-2-2, 解析モデルの評価

本章ではシミュレーション結果との比較により、理論解析モデルの妥当性を示す。表1にシミュレーション諸元を示す。

表1 シミュレーション諸元

DATA フレームの伝送速度	18 Mbps
ACK フレームの伝送速度	12 Mbps
HEADER	36 μ sec
ACK	32 μ sec
SIFS	16 μ sec
DIFS	32 μ sec
CW_{min}	128
σ	9 μ sec
端末間の距離	45 m
送信範囲	60 m
キャリアセンス範囲	60 m

図9に4ホップネットワークのペイロードサイズに対する最大スループットを示す。図9では実線を解析モデルによる結果、プロットをシミュレーション結果としている。半二重通信マルチホップネットワークにおける理論解析及びシミュレーション結果も示す。半二重通信マルチホップネットワークにおける理論解析は全端末のセカンダリ送信確率を0、つまり $\beta_i = 0$, ($i = 0, 1, 2, \dots, H-1$)として導出している。図9より提案の解析モデルの結果とシミュレーション結果が定量的に一致していることが確認できる。さらに全二重通信のスループットが半二重通信と比較して大幅に向上していることが確認できる。これは全二重通信により、各端末のキャリアセンスによる通信待機時間を減少し、さらに隠れ端末の衝突を軽減しているためである。以上より、マルチホップネットワークを全二重通信へ適応することの有効性が定量的に確認できる。

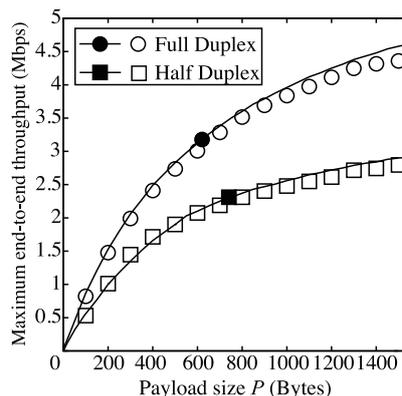


図9 4ホップネットワークにおけるペイロードサイズに対する最大スループット。

図10にホップ数に対する最大スループットを示す。図10より解析モデルの結果はシミュレーション結果と定量的に一致していることから、任意のホップ数においても解析モデルの妥当性が確認できる。また、任意のホップ数に対して全二重通信によりスループットの向上が得られていることが確認できる。

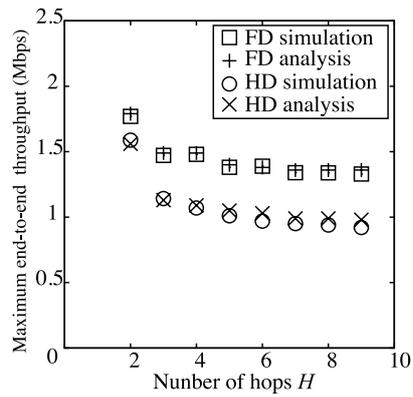


図 10 ホップ数に対する最大スループット

4 まとめ

本研究では，無線全二重通信ネットワークにおける理論解析の基礎理論の導出した. ネットワークを構成する「個」の動作がネットワーク「全体」の振舞いに及ぼす影響をボトムアップ的にモデル化することにより，無線全二重通信ネットワークにおける統一的理論解析技術の基礎理論を導出した. MAC 層のモデル化では，FD MAC の本質的な動作を詳細にモデル化し，それらをネットワークとして関連付けすることで，ネットワーク層のモデル化を行った. 解析対象を WLAN およびマルチホップネットワークとして，それぞれの層の解析モデルの妥当性を示した.

今後の課題として，ネットワークフロー間の関連付けを考慮することで，トランスポート層のモデル化，また，これらの解析モデルを基にプロトコル設計への応用が挙げられる.

【参考文献】

- [1] M. Jain, J. Choi, T. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, S. Katti, and P. Sinha, "Practical, real-time, full duplex wireless," in Proc. *ACM 17th Annu. Int. Conf. Mobile Comput. Netw.*, pp. 301-312, Sep. 2011.
- [2] K. M. Thilina, H. Tabassum, E. Hossain and D. I. Kim, "Medium access control design for full-duplex wireless system: Challenges and approaches," *IEEE Communication Magazine*, vol. 53, no. 5, pp. 112-120, May 2015.
- [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] D. Malone, K. Duffy, 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.
- [5] R. D. Mohommandy, M. Y. Nederi, and K. R. Chowdhury, "Performance analysis of CSMA/CA based medium access in full duplex wireless communications," *IEEE transactions on mobile computing*, vol. 15, no. 6, pp. 1457 - 1470, June 2016.
- [6] P. C. Ng and S. C. Liew, "Throughput analysis of IEEE 802.11 multi-hop ad hoc networks," *IEEE/ACM Transactions Networking*, vol. 15, no. 2, pp. 309-322, Apr. 2007.
- [7] Y. Gao, D. Chui, and J. C. S. Lui, "Determining the end-to-end throughput capacity in multi-hop networks: methodology applications," in Proc. *¥ SIGMETRICS/Performance*, New York, NY, USA, Jun. 2006, pp.¥ 39-50.
- [8] K. Sanada, J. Shi, N. Komuro, and H. Sekiya "End-to-end delay analysis for IEEE 802.11 string-topology multi-hop networks," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E98-B, no.~7, July 2015.
- [9] K. Sanada, N. Komuro, and H. Sekiya. "End-to-end throughput and delay analysis for ieee 802.11 string topology multi-hop network using markov-chain model." in Proc. *IEEE PIMRC Hong Kong, China* 2015.
- [10] K. Tamaki, H. A. Raptino, Y. Sugiyama, M. Bandai, S. Saruwatari, and T. Watanabe, "Full duplex media access control for wireless multi-hop networks," in Proc. *2013 IEEE 7th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, June 2013.
- [11] Elaheh Askari, Sonia Aissa, "Single-band full-duplex MAC protocol for distributed access networks," *IET Commun.*, 2014, Vol. 8, no. 10, pp. 1663-1673.

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
[発表資料-1] 全二重 WLAN におけるバイナリバックオフを考慮したスループット解析	信学技報, ネットワークシステム研究会	2017年7月
[発表資料-2] 直線状無線全二重通信マルチホップネットワークにおけるスループット解析	信学技報, ネットワークシステム研究会	2017年7月
[発表資料-3] 直線状無線全二重通信マルチホップネットワークにおけるスループットおよび遅延解析	電子情報通信学会ソサイエティ大会	2017年9月
[発表資料-4] Throughput analysis for Full Duplex Multi-hop network	WPMC 2017	2017年12月

【文字のフォントとサイズについて】

- タイトル
左揃え (日) MSゴシック (英) Arial 14pt
- 研究者
左揃え (日) MS明朝 (英) Centuey 10pt (タブ設定されています)
- 見出し1
左揃え (日) MSゴシック (英) Arial 11pt
- 見出し2
左揃え (日) MSゴシック (英) Arial 10pt
- 見出し3
左揃え (日) MSゴシック (英) Arial 10pt
- 本文
左揃え (日) MS明朝 (英) MS明朝 10pt
- 参考文献
左揃え (日) MS明朝 (英) Centuey 10pt
- 発表資料
左揃え (日) MS明朝 (英) Centuey 9pt
- 注書き
左揃え (日) MS明朝 (英) MS明朝 10pt