

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

眞田 耕輔[†] 森 香津夫[†]

[†] 三重大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1544

E-mail: †{k.sanada,kmori}@elec.mie-u.ac.jp

あらまし これまでの無線通信において、同じ周波数上では半二重通信が一般的であったが、近年の電波干渉除去技術の発展に伴い、同じ周波数で送信と受信を同時に行う無線全二重通信技術が実用化されつつある。しかし、複数の端末が結合したネットワークにおける無線全二重通信では、端末間で互いの通信への干渉を考慮しながら送受信のタイミングを合わせる必要があり、そのネットワークの動作の把握やプロトコル設計は一層困難となる。適切なプロトコル設計やネットワークの振舞いの把握において、数理モデルの構築は非常に有効であり、強力なルールとなりうる。本稿では、全二重通信 WLAN におけるバイナリバックオフを考慮した理論解析を提案する。無線全二重通信 MAC プロトコルの本質的な動作とバイナリバックオフを同時に考慮したマルコフ連鎖モデルを新たに提案する。本解析より、全二重通信 WLAN における任意の CW_{min} および任意の端末数の飽和スループットが理論的に導出される。シミュレーションとの比較により本解析モデルの妥当性を示す。

キーワード 無線全二重通信, WLAN, スループット解析, マルコフ連鎖モデル, バイナリバックオフ, FD MAC.

Throughput Analysis of CSMA/CA-based MAC with Binary Backoff in Full Duplex WLAN

Kosuke SANADA[†] and Kazuo MORI[†]

[†] Graduate School of Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering, Mie University
Kurimamachiya-cho 1544, Tsu-shi, Mie, 514-8507 Japan

E-mail: †{k.sanada,kmori}@elec.mie-u.ac.jp

Abstract This paper proposes analytical expressions of carrier sense multiple access with collision avoidance (CSMA/CA) based medium access control (MAC) with binary backoff in full duplex (FD) wireless local area network (WLAN). A new Markov-chain model for FD MAC taking into account binary backoff is proposed. By using this model, saturated throughput of both FD and half duplex modes for any minimum contention window (CW_{min}) and any number of nodes can be obtained. Additionally, optimal value of CW_{min} for achieving the benefits of FD communication can be obtained from the proposed model. The analytical predictions agree with simulation results quantitatively, which validates the proposed analytical expressions.

Key words Wireless full duplex networks, WLAN, throughput analysis, Markov-chain model, binary backoff, FD MAC.

1. はじめに

これまでの無線通信において、同じ周波数では半二重通信が一般的であったが、近年の電波干渉除去技術の発展に伴い、同じ周波数で送信と受信を同時に行う無線全二重通信技術が実用化されつつある。無線全二重通信では、1対1の端末間の通信において単純にその通信容量を2倍にすることができることや、隠れ端末による衝突を軽減できるといった点で、現在多くの研究者に注目されている [1]-[9]。しかし、複数の端末が結合したネットワークにおける無線全二重通信では、端末間でお互いの

通信への干渉を考慮しながら送受信のタイミングを合わせる必要がある。そのため、無線全二重通信の性能を最大限引き出せるとは限らず、適切な MAC プロトコル設計が必要となる。ネットワークのプロトコル設計において、端末の動作とそれらの結合により生じるネットワークの振舞いを把握することは重要である。数理モデルの構築はネットワークの振舞いの把握に効果的であり、設計に限らず最適化等様々な分野へと応用が可能である [8]-[10]。

CSMA/CA に基づく無線全二重通信 MAC プロトコル (FD MAC) の方式として、制御フレーム等を用いて送受信のタイ

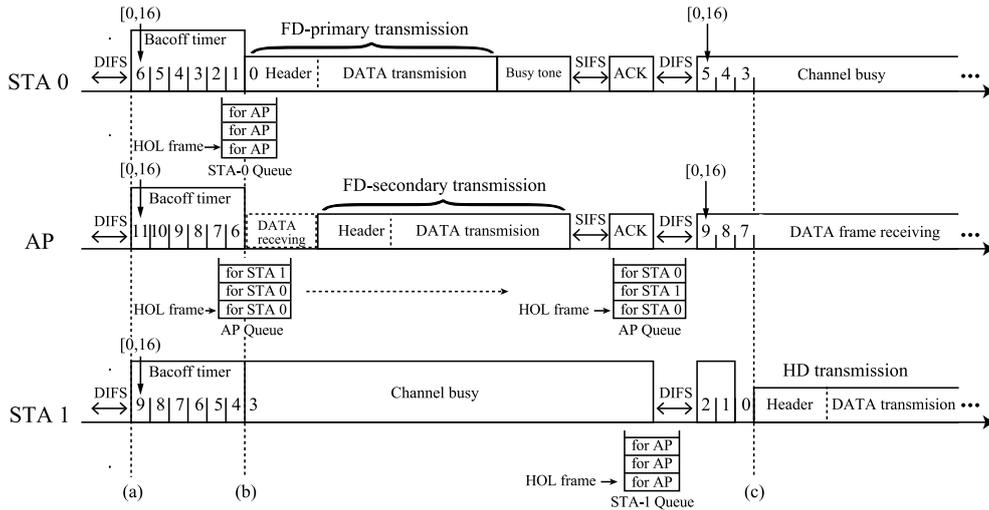


図 1 非同期型 FD MAC におけるチャネルアクセス例.

ミングを合わせる同期型 FD MAC [2]-[4] と、制御フレームを用いない非同期型 FD MAC が提案されている。非同期型 FD MAC [5]-[8] では、先に送信権を獲得した端末がプライマリ送信を行う。プライマリ送信とは、全二重通信の開始を全二重通信のもう一方の端末(セカンダリ送信端末)に通知しつつデータの伝送を行う仕組みである。同期型 FD MAC および非同期型 FD MAC のどちらの方式も、最初にバックオフタイマを 0 にして送信権を得てプライマリ送信を行い、その送信に対応する端末がセカンダリ送信を行う。このとき、セカンダリ送信を行う端末は、バックオフタイマが 0 でなくてもセカンダリ送信へ移行することができる。この動作は同期型および非同期型 FD MAC において共通な動作であり、FD MAC の本質的な動作であるといえる。文献 [9] では、ビアンキのマルコフ連鎖モデルに基づく解析モデル [10] に FD MAC の本質的な動作を考慮することにより、全二重 WLAN における理論解析モデルが提案されている。しかし、文献 [9] では DCF におけるバイナリバックオフは考慮されていない。そのため、コンテンションウィンドウの最小値 CW_{min} が小さいネットワークでは文献 [9] の解析モデルを適用することができない。任意の端末数および任意の CW_{min} に適用可能な理論解析モデルの構築において、バイナリバックオフを考慮することが必要である。

本稿では、全二重通信 WLAN におけるバイナリバックオフを考慮した理論解析を提案する。FD MAC の本質的な動作とバイナリバックオフを同時に考慮したマルコフ連鎖モデルを新たに提案する。本解析より、全二重通信 WLAN において任意の CW_{min} および任意の端末数の飽和スループットが理論的に導出される。シミュレーションとの比較により本解析モデルの妥当性を示す。

2. FD MAC とその理論解析

図 1 に CSMA/CA 方式の非同期型 FD MAC プロトコルのチャネルアクセス例を示す。図 1 では、1 台の AP と 2 台の 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 1(a))。図 1 の例では $CW_{min} = 16$ としている。図 1(b) において、STA0 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 [5]。ヘッダ部を受信した AP は、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 1 (c))。一方の送信が終了した場合は、もう一方のフレーム送信が終了するまで busytone 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 フレーム送信を全二重通信で行う。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。AP の先頭のフレームの宛先がプライマリ送信端末と一致しないときは、全二重通信を行わず、半二重通信となる(図 1 (c)) [9]。ここで、AP が端末 1 宛のフレームがキューに存在するとき、キューの順番を操作して全二重通信を積極的に行う方法も考えられる。しかし、ハードウェアにおけるバッファサイズや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わけではなく議論が必要である [7]。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る。しかし、2 台の端末が同時に送信を開始したときに、全二重通信ができる場合は衝突とはならない。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)。CSMA/CA 方式の半二重通信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。

FD MAC を考慮した全二重通信 WLAN における理論解析が提案されている [8] - [9]。文献 [9] では、ビアンキの DCF の解析モデルに FD MAC の本質的な動作を考慮することにより、WLAN における非同期型 FD MAC の理論解析モデルが提案されている。しかし、文献 [9] の解析モデルでは、DCF におけるバイナリバックオフは考慮されていない。そのため、 CW_{min} が小さいネットワークではこの解析モデルを適用することができない。 CW_{min} が小さい値ということは、送信への積極性が高いことを意味し、端末数が多い環境では通信の衝突が増加する。そこで、バイナリバックオフにより送信への積極性を低くする

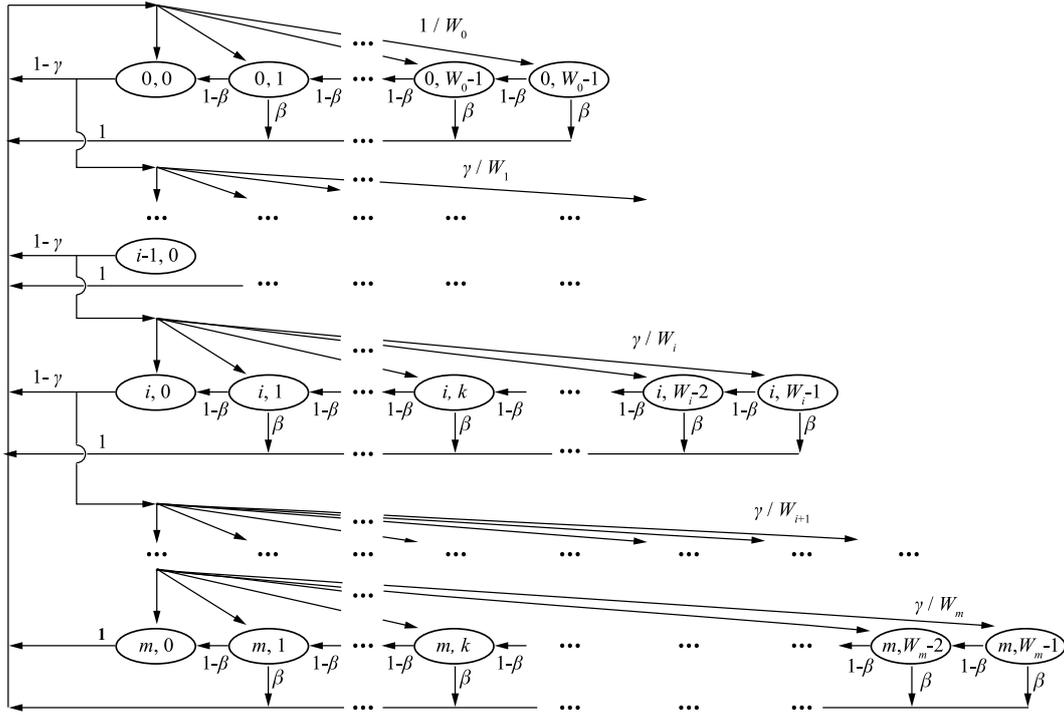


図 2 FD MAC の動作を考慮したマルコフ連鎖モデル

ことで、端末数の変化にも柔軟に対応できる。FD MAC の本質的な動作がもたらすネットワークへの影響を明らかにするために、バイナリバックオフを考慮した FD MAC の理論解析モデルの構築が必要である。

3. 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

本稿では、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手法を提案する。FD MAC の本質的な動作とバイナリバックオフを考慮したマルコフモデルを新たに提案する。本解析手法を用いることにより、任意の端末数および任意の CWmin における WLAN の飽和スループットが理論的に導出される。

本解析では、 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 および AP は全二重通信の機能を有し、2. 章で紹介した FD MAC に従って動作する。本解析における仮定を以下に示す [2]- [10]:

1. 飽和状態のネットワークを想定し、全ての端末は常にバッファに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、プライマリ送信を行った端末と一致したとき、AP はセカンダリ送信へ移行する [2]- [8]。
4. 送信失敗は MAC 層で生じ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本解析では考慮しない。
5. 全ての端末はお互いの送信を検知できるとし、隠れ端末による衝突はないとする。

3.1 プライマリ送信確率: τ

図 2 に FD MAC におけるバイナリバックオフを考慮したマルコフ連鎖モデルを示す。ここで、 β はセカンダリ送信移行確率、 γ をフレーム衝突率とする。再回数 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

$$W_i = \min(2^i CW_{min}, CW_{max}) \quad (1)$$

と表す。ここで、 CW_{max} はコンテンションウィンドウの最大値、 m は最大再回数である。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 [10]。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。仮定 (5) より、一度プライマリが成功すれば、そのセカンダリ送信は失敗しない。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を $[0, CW_{min})$ の中から選ぶ。図 2 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、

$$\begin{aligned} P[i, k|i, k+1] &= 1 - \beta, & k \in (0, W_i - 2), & i \in (0, m), \\ P[0, k|i, l] &= \beta/W_0, & k \in (0, W_0 - 1), & l \in (1, W_i - 1), \\ & & i \in (0, m) \end{aligned} \quad (2)$$

である。また、仮定 (5) より、本解析が想定している WLAN では、バックオフタイムを 0 にしたときに送信を開始するプライマリ送信において衝突が生じる。したがって、図 2 における衝突およびバイナリバックオフに関する状態遷移確率は、

$$\begin{aligned} P[0, k|i, 0] &= (1 - \gamma)/W_0 & k \in (0, W_0 - 1) & i \in (0, m - 1) \\ P[0, k|m, 0] &= 1/W_m & k \in (0, W_0 - 1). \\ P[i, k|i - 1, 0] &= \gamma/W_i & k \in (0, W_i - 1) & i \in (1, m). \end{aligned} \quad (3)$$

と表せる。ここで、マルコフモデルにおいて、バックオフステージが i 、バックオフタイムが k である状態の定常状態確率を $b_{i,k}$

と定義する [10]. 式 (2) および式 (3) より, $b_{i,k}$ と $b_{i-1,0}$ と関係式として,

$$b_{i,k} = \frac{1 - (1 - \beta)^{W_i - k}}{W_i \beta} \gamma b_{i-1,0}, \quad \text{for } 1 \leq i \leq m \quad (4)$$

を得る. 式 (4) において, $k = 0$ を代入することにより,

$$b_{i,0} = \frac{1 - (1 - \beta)^{W_i}}{W_i \beta} \gamma b_{i-1,0} = \dots = \gamma^i b_{0,0} \prod_{j=1}^i \omega_j \quad (5)$$

を得る. ここで,

$$\omega_j = \frac{1 - (1 - \beta)^{W_j}}{W_j \beta} \quad (6)$$

である. プライマリ送信が成功すると, 次のフレーム送信へのバックオフタイムは $[0, W_0]$ から選ばれる. 同様に, セカンダリ送信として送信が成功した際も次のフレーム送信へのバックオフタイムを新しく選ぶ. したがって, マルコフ連鎖モデルの各状態と最上段の状態との関係式として,

$$b_{0,k} = \frac{1 - (1 - \beta)^{W_i - k}}{W_i \beta} \times \left[(1 - \gamma) \sum_{i=0}^{m-1} b_{i,0} + b_{m,0} + \beta \sum_{i=0}^m \sum_{k=1}^{W_i - 1} b_{i,k} \right] \quad (7)$$

を得る. 全ての定常状態確率の和は 1 であることから,

$$\sum_{i=0}^m \sum_{k=1}^{W_i - 1} b_{i,k} = 1 - \sum_{i=0}^m b_{i,0}. \quad (8)$$

と表せる. したがって, 式 (5), 式 (6), 式 (8), および式 (9) より,

$$b_{0,0} = \frac{\beta}{\omega_0 - (1 - \gamma + \beta) \left[1 + \sum_{i=1}^{m-1} \left(\gamma^i \prod_{j=1}^i \omega_j \right) \right] - \gamma^m \prod_{j=1}^m \omega_j} \quad (9)$$

である. プライマリ送信確率 τ は, 各バックオフステージにおけるタイムが 0 のときの定常状態確率の和として表せるので,

$$\begin{aligned} \tau &= \sum_{i=0}^m b_{i,0} \\ &= \frac{\beta \left[1 + \sum_{i=1}^m \left(\gamma^i \prod_{j=1}^i \omega_j \right) \right]}{\omega_0 - (1 - \gamma + \beta) \left[1 + \sum_{i=1}^{m-1} \left(\gamma^i \prod_{j=1}^i \omega_j \right) \right] - \gamma^m \prod_{j=1}^m \omega_j}. \end{aligned} \quad (10)$$

と導出される. 式 (10) において, $\beta \rightarrow 0$ とすることにより, 半二重送信のみを考慮した端末の送信確率が得られる. これはビアンチの DCF の理論解析から得られる送信確率と一致する.

本解析では, 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 を想定しているため, AP と STA とでセカンダリ送信移行確率は異なる. AP と STA に関する未知数を区別するために, 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.

3.2 セカンダリ送信移行確率: β

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 $\binom{n}{1} \tau_{sta} (1 - \tau_{sta})^{n-1}$ と表せる. 仮定 (2) より, AP は各端末宛のフレームを一律な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. 仮定 (3) より, AP のセカンダリ送信移行確率は,

$$\beta_{ap} = \binom{n}{1} \frac{1}{n} \tau_{sta} (1 - \tau_{sta})^{n-1} = \tau_{sta} (1 - \tau_{sta})^{n-1} \quad (11)$$

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

$$\beta_{sta} = \frac{1}{n} \tau_{ap} (1 - \tau_{ap})^{n-1} \quad (12)$$

と表せる.

3.3 衝突率: γ

2 台以上の端末が同時にバックオフタイムを 0 としたとき, フレームの衝突となる. ただし, AP と STA がタイムを同時に 0 し, お互いのフレームの宛先がお互いであるときは衝突とはならず, 全二重通信を行う. したがって, AP および STA の衝突率はそれぞれ

$$\gamma_{ap} = 1 - (1 - \tau_{sta})^n - \frac{\tau_{sta}}{n} (1 - \tau_{sta})^{n-1} \quad (13)$$

および

$$\gamma_{sta} = 1 - (1 - \tau_{sta})^{n-1} (1 - \tau_{ap}) - \frac{\tau_{ap}}{n} (1 - \tau_{sta})^{n-1} \quad (14)$$

と表せる.

式 (6), 式 (10), 式 (11), 式 (12), 式 (13) および式 (14), より 6 つの未知数 τ_{ap} , τ_{sta} , β_{ap} , β_{sta} , γ_{ap} および γ_{sta} を含む 6 つの代数方程式を得る. これらを数値的に解くことにより, 6 つの未知数の値を得ることができる. 本解析では, 数値計算に Newton 法を用いた.

3.4 飽和スループットの導出: E

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. ビアンチの解析モデル [10] における飽和スループットの定義は

$$E = \frac{E[\text{payload of information transmitted in a slot time}]}{E[\text{length of a slot time}]} \quad (15)$$

である. 式 (15) 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.

少なくとも 1 台以上の端末が送信を行っている確率は,

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau_{ap})(1 - \tau_{sta})^n. \quad (16)$$

と表せる. そのうち, 全二重通信が行われている確率を考える. AP がバックオフタイムを 0 にして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 がバックオフタイマを 0 にしてプライマリ送信を行った場合、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

$$P_{FD1} = \frac{\tau_{ap}(1-\tau_{sta})^n}{P_{tr}} + \frac{\tau_{sta}(1-\tau_{ap})(1-\tau_{sta})^{n-1}}{P_{tr}} \binom{n}{1} \frac{1}{n}$$

$$= \frac{\tau_{ap}(1-\tau_{sta})^n + \tau_{sta}(1-\tau_{ap})(1-\tau_{sta})^{n-1}}{P_{tr}}. \quad (17)$$

と表せる。また、AP と 1 台の STA が同時にタイマを 0 にしてデータを送信したことにより、全二重通信が行われる確率は

$$P_{FD2} = \frac{\tau_{sta}\tau_{ap}(1-\tau_{sta})^{n-1}}{P_{tr}} \binom{n}{1} \frac{1}{n} = \frac{\tau_{ap}\tau_{sta}(1-\tau_{sta})^{n-1}}{P_{tr}} \quad (18)$$

と現せる。

STA がバックオフタイマを 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

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

$$= \frac{(n-1)\tau_{sta}(1-\tau_{ap})(1-\tau_{sta})^{n-1}}{P_{tr}}. \quad (19)$$

と現せる。

以上より、全二重通信が行われたときは、1 つのデータフレームの送信時間のうちに 2 つ分のデータ送信が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式 (20) として導出できる。式 (20) において、 $T_s = DIFS + DATA + SIFS + ACK$ 、 $T_c = DIFS + DATA$ 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、 H 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 [9]。

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図 2. の FD MAC の動作を実装を行った。オリジナルネットワークシミュレータの妥当性は ns3 [11] との比較を行い、同様な結果を得ることを確認している [12]。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 3 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 3 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。 $CW_{min} = 256$

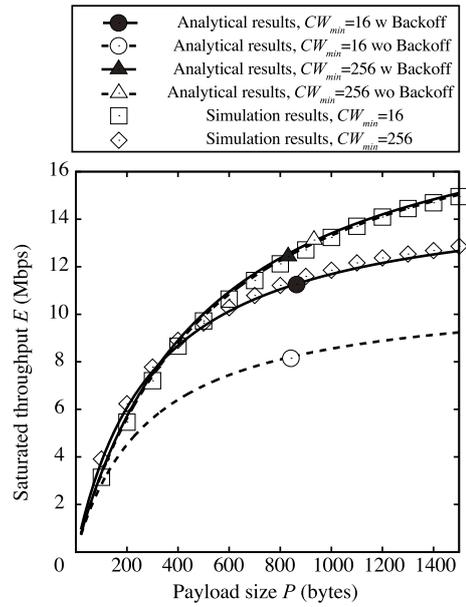


図 3 STA11 台のときのペイロードサイズに対する飽和スループット。

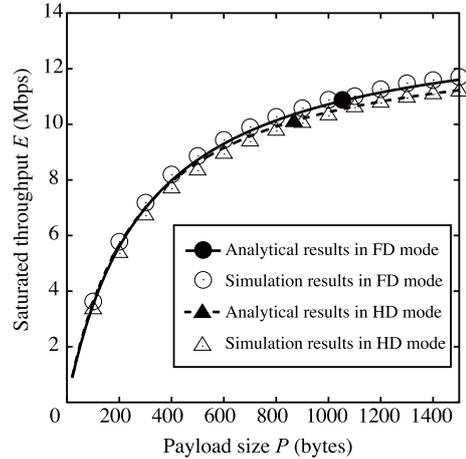


図 4 STA15 台のときのペイロードサイズに対する飽和スループット： $CW_{min}=16$ 。

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 3 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 および図 5 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 4 および図 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 4 および図 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れている。シ

$$E = \frac{P_{tr} [(P_{FD1} + P_{FD2}) \times 2P + P_{HD} \times P]}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr}P_{s_{FD}}(T_s + H) + P_{tr}(P_{FD2} + P_{s_{HD}})T_s + P_{tr}(1 - P_{FD1} - P_{FD2} - P_{HD})T_c}. \quad (20)$$

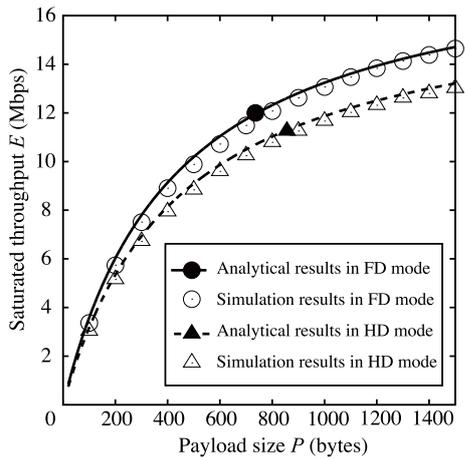


図5 STA15台のときのペイロードサイズに対する飽和スループット: $CW_{min}=256$.

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が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、 $CW_{min}=64, 256$ 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、プライマリ送信端末宛のフレームを先にセカンダリ送信で送信を行うキューの操作(CQ; Change Queueing)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。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。そのため、 $P_{HD}=0$ および

$$P_{FD1} = \frac{\tau_{ap}(1 - \tau_{sta})^n + n\tau_{sta}(1 - \tau_{ap})(1 - \tau_{sta})^{n-1}}{P_{tr}} \quad (21)$$

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。これらは今後の課題としたい。

5. おわりに

本稿では、全二重通信WLANにおけるバイナリバックオフを考慮した理論解析を提案した。FD MACの本質的な動作とバイナリバックオフを同時に考慮したマルコフ連鎖モデルを新たに提案した。本解析により、全二重通信WLANにおいて任意の CW_{min} および任意の端末数の飽和スループットが理論的に導出される。シミュレーションとの比較により提案する解析モデルの妥当性を示した。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金(No. 17K14681)および電

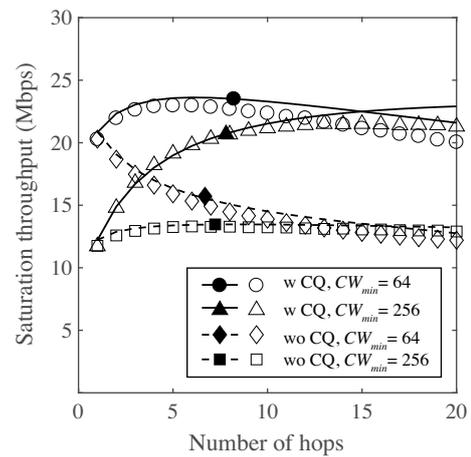


図6 $CW_{min}=64, 256$ におけるSTA台数に対する飽和スループット。

気通信普及財団の補助を受けて行われた。ここに深謝の意を表する。

文 献

- [1] 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.
- [2] A. Sahai, G. Patel, and A. Sabharwal, (July 2011) "Pushing the limits of full-duplex: design and real-time implementation," [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1107.0607>.
- [3] W. Cheng, X. Zhang, and H. Zhang, "RTS/FCTS mechanism based full-duplex MAC protocol for wireless networks," in Proc. 2013 IEEE GLOCECOM, pp. 5017-5022, Dec. 2013.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] M. Duarte, A. Sabharwal, V. Aggarwal, R. Jane, K. K. Ramakrishna, C.W. Rice, and N. K. Shankaranarayanan, "Design and characterization of a full-duplex multiantenna system for wifi networks," *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 63, no. 3, pp. 1160-1177, March 2014.
- [7] J. Seddar, H. Khalife, and W. A. Safwi, "A full duplex MAC protocol for wireless networks," 2015 Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IECMC), 2015.
- [8] Y. Liao, K. Bian, L. Song, and Z. Han, "Full-duplex MAC protocol design and analysis," *IEEE Trans. Letters*, vol. 19, no. 7, pp. 1457-1470, July 2015.
- [9] R. D. Mohommandy, M. Y. Naderi, and K. R. Chowdhury, "Performance analysis of CSMA/CA based medium access in full duplex wireless communications," *IEEE transactions on mobile computing*, vol. 15, no. 6, pp. 1457-1470, June 2016.
- [10] 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.
- [11] The network simulator - ns3, <http://www.nsnam.org>
- [12] Original network simulator, <http://www.com.elec.mie-u.ac.jp/programs/index.html>