

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

藤村 力[†] 眞田 耕輔[†] 森 香津夫[†]

[†] 三重大学工学研究科 〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577

E-mail: [†]fc0922@com.elec.mie-u.ac.jp, ^{††}{k.sanada, kmori}@elec.mie-u.ac.jp

あらまし 無線全二重通信とはデータフレームの送受信を行うことができる通信方式である。無線マルチホップネットワークとは、基地局などのインフラを必要とせず、端末間でデータの中継を行うネットワークであり、無線全二重通信をマルチホップネットワークに適応させることにより、システムのスループットの向上が期待される。本稿では、エアタイムを用いた無線半二重通信マルチホップネットワークにおける解析手法と無線全二重通信 MAC プロトコルの動作を考慮したマルコフ連鎖モデルに基づく理論解析手法を統合することにより、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を提案する。本稿で得られる解析モデルより、任意のホップ数および任意のペイロードサイズに対する無線全二重通信マルチホップネットワークの最大スループットを理論的に導出する。ネットワークシミュレータとの比較により本解析モデルの妥当性を確認する。半二重通信環境との比較により、マルチホップネットワークにおける全二重通信の適応の有効性を定量的に確認する。

キーワード 無線全二重通信, CSMA/CA, マルチホップネットワーク, Full Duplex MAC, マルコフ連鎖モデル

Throughput Analysis for String-Topology Full-Duplex Multi-hop Network

Chikara FUJIMURA[†], Kosuke SANADA[†], and Kazuo MORI[†]

[†] Department of Electrical and Electronic Engineering Mie University 1577 Kurimamachiya-cho Tsu city,
Mie 514-8507 JAPAN

E-mail: [†]fc0922@com.elec.mie-u.ac.jp, ^{††}{k.sanada, kmori}@elec.mie-u.ac.jp

Abstract In wireless full-duplex communication, data-frame transmission and reception are performed simultaneously. Wireless multi-hop networks are flexible networks because they require neither centralized control terminal nor existing infrastructures. Various advantages can be obtained by applying the full-duplex to wireless multi-hop networks. This paper proposes analytical expressions for string-topology wireless full duplex multi-hop network. For achieving those, analytical model of multi-hop networks with half duplex communication and analytical model based on Bianchi's Markov-chain model with full duplex MAC are integrated. Maximum end-to-end throughput of full-duplex multi-hop network for any number of hops and any payload size can be obtained from the proposed model. The analytical expressions are verified by comparisons with simulation results. From the comparison with the results in half-duplex multi-hop network, the effectiveness of full-duplex communication in multi-hop networks are confirmed.

Key words Wireless full duplex, CSMA/CA, multi-hop networks, full duplex MAC, Markov-chain model.

1. はじめに

無線全二重通信とはデータフレームの送受信を同じチャンネル上で行うことができる通信方式であり、無線通信システムのスループットを倍増することが可能であるとしてその実用化が検討されている [1]- [9]。また、無線全二重通信技術をマルチホップネットワークに適応させることにより、マルチホップネット

ワークの性能劣化の主な要因である隠れ端末による衝突を低減させることができる [7]。しかし、隠れ端末による衝突を完全になくすることはできず性能劣化の主な要因であることに変わらない。無線マルチホップネットワークでは、基地局を必要とせず端末間で柔軟にネットワークを構築できるが、自律分散制御であるためネットワークにおける個の動作と全体の振る舞いを把握することは容易ではない。無線全二重マルチホップネット

ワークでは、さらに個々の端末間における全二重通信の送受信のタイミングを合わせるといった要素を考慮する必要があるため、無線半二重通信環境よりもさらに複雑なネットワークの振る舞いが生成されると考えられる。これらの要素を考慮した上で、無線全二重通信の性能を最大限に引き出す MAC プロトコル設計が必要であり、近年そのプロトコル提案に関する研究が増えてきている [4]- [9]。適切な MAC プロトコル設計においても無線全二重通信マルチホップネットワークが生み出すネットワークの振る舞いを陽に把握することは重要であり、数理モデルの構築は非常に強力なツールとなる。

CSMA/CA に基づく無線全二重通信ネットワークにおける MAC プロトコル (Full-Duplex MAC: FD MAC) では、送信権を獲得した端末はプライマリ送信を開始し、その端末によりセカンダリ送信端末に指定された端末が全二重通信を行う。FD MAC ではプライマリ送信とセカンダリ送信のタイミングを合わせるためことが重要であり、これまで同期型と非同期型 FD MAC が提案されている [5]- [9]。同期型および非同期型の FD MAC に共通する本質的な動作として、セカンダリ送信端末は自身のバックオフタイマーがゼロでなくても、データ送信を開始することができるということである。文献 [1] では Bianchi のマルコフ連鎖モデル [14] による解析手法に基づき、この FD MAC の本質的な動作を考慮した wireless local area network(WLAN) における理論解析モデルを提案している。しかし、文献 [1] の解析モデルでは、アクセスポイントと端末間における全二重通信のみ考慮されており、マルチホップネットワークの個々の端末間における FD MAC の動作を表現することはできない。無線全二重通信マルチホップネットワークにおける解析手法を得るためには、FD MAC の本質的な動作を個々の端末ごとに考慮する必要がある。

一方、これまで多くの無線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手法が提案されている。その有効な解析手法としてエアタイムを用いた解析手法が提案されている [10]- [13]。この解析手法は端末ごとに異なるチャンネルアクセス状態や隠れ端末による衝突率を容易に表現することができる。このエアタイムに基づく解析手法と FD MAC を考慮した Bianchi のマルコフ連鎖モデル [14] に基づく解析手法を統合することにより、FD MAC の本質的な動作を端末ごとに考慮することができる。

本稿では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、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モデルを提案する。本稿で得られる解析モデルより、任意のペイロード及び任意のホップ数に対する全二重通信マルチホップネットワークの最大スループットを理論的に導出する。計算機によるシミュレーション結果との比較により本解析モデルの妥当性を確認する。半二重通信環境との比較により、マルチホップネットワークにおける全二重通信の適応の有効性を定量的に確認する。

2. 従来研究

2.1 無線全二重通信における MAC プロトコル

図 1 に無線全二重通信における 3 つの伝送モードを示す。それぞれ bidirectional モード (図 1(a)), destination-based モード (図 1(b)) および source-based モード (図 1(c)) である [4]。

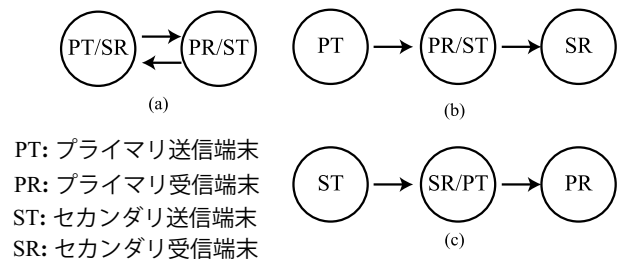


図 1 無線全二重通信の伝送モード: (a) bidirectional モード, (b) destination-based モード, (c) source-based モード。

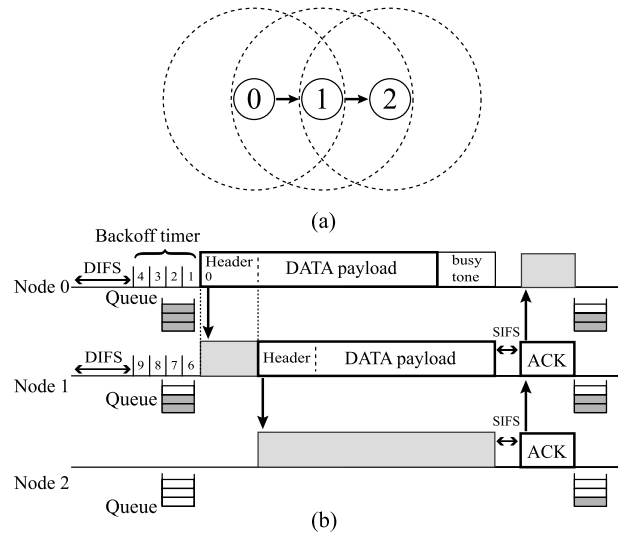


図 2 (a) 2 ホップネットワーク, (b) destination-based モード使用時の非同期型 FD MAC プロトコルにおけるチャンネルアクセスの例。

図 1(a) の bidirectional 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。つまりプライマリ送信端末 (受信端末) はセカンダリ受信端末 (送信端末) となる。図 1(b)(c) の destination-based モードおよび source-based モードでは、3 端末間で無線全二重通信を行う。destination-based モードではプライマリ受信端末がセカンダリ送信端末となる。source-based モードではプライマリ送信端末がセカンダリ受信端末となる。片方向フローのデータを中継するマルチホップネットワークの場合、主に destination-based モードと source-based モードの適応が想定される [8]。

無線全二重通信ネットワークでは端末間でのデータ送受信のタイミングを合わせる必要があるため、そのための FD MAC プロトコルとして同期型 [5]- [6] と非同期型 [7]- [9] の 2 種類の方式が提案されている。同期型 FD MAC は制御フレームを用いることにより、端末間で全二重通信のフレーム送受信のタイミングを合わせている。非同期型 FD MAC では、プライマリ送信端末が送信フレームの MAC ヘッダーにセカンダリ送信を行う端末情報を含めることで制御フレームなしで全二重通信を開始することができる。

図 2(a) に直線状 2 ホップマルチホップネットワーク、図 2 (b) にそのネットワークの destination-based モードにおける非同期型 FD MAC のチャンネルアクセスの例を示す。ここで端末 0 は端末 2 宛のデータを生成し端末 1 はそのデータを中継する。図 2 (b) では端末 0 と端末 1 は共にバッファのないフレームを保持しているとする。各端末は Distributed Coordination Function(DCF) の動作に従い送信開始前にバックオフタイマー

の値を $[0, CW_{min} - 1]$ の範囲でランダムに選択する．ここで CW_{min} は最小の contention window (CW) の値を示す．端末 0 のバックオフタイマーが 0 となったとき端末 0 は端末 1 へデータ送信を開始する．destination-based モードでは，端末 1 はプライマリ送信端末である端末 0 の送信を受信することによってセカンダリ送信端末として送信権を得る．つまり，セカンダリ送信端末は自身のバックオフタイマーが 0 でなくてもデータ送信に移行することができる．これは同期型，非同期型共に共通の動作であり，FD MAC の本質的な動作である．また，端末 1 がバッファ内にフレームを保持していなかった場合は端末 0 からプライマリ送信を受信してもセカンダリ通信に移行せず，端末 0 の通信は半二重通信となる．

2.2 FD-MAC を考慮した理論解析

文献 [1]- [2] では FD MAC を考慮した解析モデルが提案されている．文献 [1] ではセカンダリ送信端末は自身のバックオフタイマーが 0 でなくてもデータ送信に移行可能という FD MAC の本質的な動作を Bianchi のマルコフ連鎖モデル [14] を拡張することによって表現している．しかしながら，これまで提案されている解析モデルはアクセスポイントと端末間における全二重通信のみ考慮し，さらにネットワークにおける全ての端末は常にフレームを保持している状態 (飽和状態) を仮定している．マルチホップネットワークでは各端末は自律分散的に動作を行うため，隠れ端末による衝突やキャリアセンスによる影響は端末ごとに異なる．また，マルチホップネットワークではデータフレームを中継していくため非飽和状態を端末の動作を考慮する必要がある．無線全二重通信マルチホップネットワークの理論解析モデルの構築において端末の自律分散的な動作と FD MAC の動作を同時に考慮する必要がある．

2.3 無線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モデル

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 [10]- [13]．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

$$X_i = \lim_{Time \rightarrow \infty} \frac{S_i}{Time} \quad (1)$$

と定義される [10]．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 [12] 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 [13] ではエアタイムと Bianchi のマルコフ連鎖モデル [14] を統合させた解析モデルを提案している．

3. 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

図 3 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．本解析における仮定を以下に示す [9]- [13]．

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

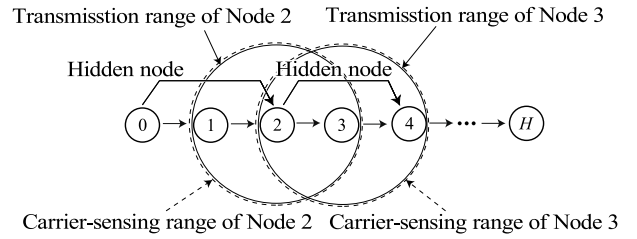


図 3 片方向フロー H ホップ直線状マルチホップネットワーク．

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 [6] [9]．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. 全ての端末は destination based モードで無線全二重通信を行う．

5. バックオフタイマーは常に $[0, W_{min} - 1]$ の範囲から選択するとしバイナリーバックオフの機能は考慮しない [1]．

3.1 MAC 層における各端末の動作

3.1.1 全二重通信を考慮したエアタイムの解析表現

全ての端末は DCF の動作に従い自身のバックオフタイマーが 0 となった時フレームを送信を開始する．FD MAC ではさらに，バックオフタイマーのカウント中であってもセカンダリ送信へと移行することができる．このように FD MAC における送信手段では，バックオフタイマーが 0 になったことで送信を開始する送信とタイマーが 0 でなくてもセカンダリ送信端末としてデータ送信を行う 2 種類の送信手段がある．本解析では，前者の送信手段を Basic 送信，後者を Secondary 送信と呼ぶことにする．エアタイムの解析手法を用いて各端末において Basic 送信と Secondary 送信に使用された時間をそれぞれ導出することが本解析における解析戦略である．ここで，端末 i の全送信回数における Basic 送信回数の比率を Δ_i と定義する．同様に端末 i の全送信回数における Secondary 送信回数の比率は $1 - \Delta_i$ と定義する．Basic 送信エアタイムと Secondary 送信エアタイムはそれぞれ，

$$X_{BA_i} = \Delta_i X_i \quad (2)$$

および

$$X_{SC_i} = (1 - \Delta_i) X_i \quad (3)$$

と表せる．Basic 送信には半二重通信とプライマリ送信として全二重通信を行う 2 つの種類が存在する．ここで，端末 i の Basic 送信回数のうち半二重通信回数の比率を Ω_i と定義する．同様に端末 i の Basic 送信回数のうちプライマリ通信回数の比率を $1 - \Omega_i$ と表せる．半二重通信エアタイムとプライマリ送信エアタイムはそれぞれ，

$$X_{HD_i} = \Omega_i \Delta_i X_i \quad (4)$$

および

$$X_{PR_i} = (1 - \Omega_i) \Delta_i X_i \quad (5)$$

と表せる．式 (2), (3), (4), (5) より $X_{HD_i} + X_{PR_i} + X_{SC_i} = X_i$ と得ることができる．本解析では，destination-based モードの

みを想定している。したがって、端末 i のプライマリ送信を行っているとき、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っている最中は送信を開始しない。プライマリ送信は隠れ端末による衝突の影響を受けることないと仮定すると、端末 i のスループットは、衝突率 γ_i を用いて

$$E_i = (X_{HD_i} + X_{SC_i})(1 - \gamma_i) \frac{P}{T} + X_{PR_i} \frac{P}{T+h} \quad (6)$$

と表せる。ここで $T = DIFS + DATA + SIFS + ACK$ であり、それぞれ Acknowledgement(ACK) フレーム送信時間, Distributed interframe space(DIFS), Short interframe space(SIFS) 期間である。 h は“ヘッダー”の送信時間である。 γ_i の導出は 3.2.2 章で説明する。 Δ_i と Ω_i は 3.2 章で説明する FD MAC を考慮したマルコフ連鎖モデルより導出する。

各端末のエアタイムを用いることで端末 i のキャリアセンスエアタイムを導出する [10]- [13]。 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で表せる。 destination-based モードを考慮した場合、 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、

$$Y_i = X_{i-1} - X_{PR_{i-1}} + X_{i+1} - X_{SC_{i+1}} - \frac{(X_{i-1} - X_{PR_{i-1}})(X_{i+1} - X_{SC_{i+1}})}{1 - X_i} \quad (7)$$

と表せる。 半二重通信マルチホップネットワークを考慮した場合、 $X_{PR_i} = X_{SC_i} = 0$ ($i = 0, 1, \dots, H-1$) となるため、 Y_i は $X_{i-1} + X_{i+1} - X_{i-1}X_{i+1}/(1 - X_i)$ となる。 これは文献 [11] における式 (10) と一致し、 式 (7) は全二重通信と半二重通信のどちらも考慮していることを示す。

3.1.2 フレーム保持確率

チャン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 [12]。 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ン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、チャンネルアイドル状態である。 したがって、 端末 i のチャンネルアイドルエアタイムは、

$$Z_i = 1 - X_i - Y_i \quad (8)$$

と表せる。 仮定 (1) より端末 i のフレーム到着率は

$$\lambda_i = \begin{cases} \frac{O}{P} & \text{for } i = 0 \\ \frac{E_{i-1}}{P} & \text{for } i = 1, 2, \dots, H-1 \end{cases} \quad (9)$$

と表せる。 ここで、 O 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

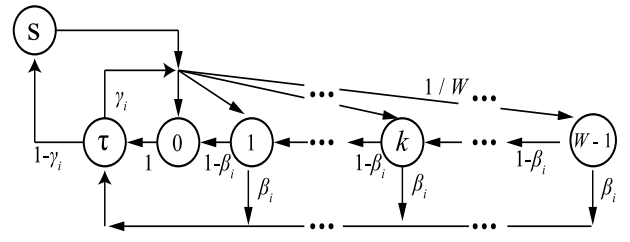


図 4 端末 i での FD MAC を考慮したマルコフ連鎖モデル。

ト数を U_i と定義するとフレーム保持確率は

$$q_i = \min\left(\frac{\lambda_i U_i \sigma}{Z_i}, 1\right) \quad (10)$$

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 [12]。 U_i は、 次節で説明する FD MAC を考慮したマルコフ連鎖モデルより導出する。

3.2 FD MAC を考慮したマルコフ連鎖モデル

図 4 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。 このモデルにおいて状態 k ($0 \leq k \leq W-1$) はバックオフタイマーの値が k である状態を示す。 $[0, W-1]$ の範囲からバックオフタイマーの値をランダムに決定し、 タイマーをカウントするごとに左隣の状態へと遷移していく。 状態 τ は Basic 送信または Secondary 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。

3.2.1 送信確率

FD MAC の本質的な動作として、 セカンダリ送信権を獲得した端末は自身のバックオフタイマーが 0 でなくても送信を行うことができる。 ここで、 端末 i の Secondary 送信移行確率を β_i として定義する。 図 4 の FD MAC の動作を考慮したマルコフ連鎖モデルにおける各状態間の遷移確率は

$$\begin{aligned} P\{k-1 | k\} &= 1 - \beta_i, & 1 \leq k \leq W-1, \\ P\{\tau | k\} &= \beta_i, & 1 \leq k \leq W-1, \\ P\{\tau | 0\} &= 1, \\ P\{S | \tau\} &= 1 - \gamma_i, \\ P\{k | \tau\} &= \gamma_i/W, & 0 \leq k \leq W-1, \\ P\{k | S\} &= 1/W, & 0 \leq k \leq W-1 \end{aligned} \quad (11)$$

と表せる。 式 (11) の遷移確率から、 端末 i の状態 k における定常状態確率は、

$$\pi_{k_i} = \frac{1 - (1 - \beta_i)^{W-k}}{W\beta_i} \pi_{\tau_i} \quad (12)$$

と表せる。 全ての定常状態確率の和は 1 であることを考慮すると

$$\sum_{k=0}^{W-1} \pi_{k_i} + \pi_{\tau_i} + \pi_{s_i} = 1 \quad (13)$$

を得る。 式 (13) より状態 τ の定常状態確率は

$$\pi_{\tau_i} = \frac{1}{1 + \sum_{k=0}^{W-1} \frac{1 - (1 - \beta_i)^{W-k}}{W\beta_i} + (1 - \gamma_i)} \quad (14)$$

と表せる。端末 i の全送信回数のうち Basic 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、

$$\Delta_i = \frac{\pi_{0_i}}{\pi_{\tau_i}} = \frac{1 - (1 - \beta_i)^W}{W\beta_i} \quad (15)$$

と表せる。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タ数は、マルコフ連鎖モデルにおける状態 S への平均再帰時間に等しいので、

$$U_i = \frac{1}{\pi_{s_i}} = \frac{1 + \sum_{k=0}^{W-1} \frac{1 - (1 - \beta_i)^{W-k}}{W\beta_i} + (1 - \gamma_i)}{(1 - \gamma_i)} \quad (16)$$

と表せる。destination-based モードでは、端末 i は端末 $i-1$ のプライマリ送信を受信することによりセカンダリ送信へ移行することができる。端末 i の Secondary 送信移行確率は端末 $i-1$ のプライマリ送信確率と等しいと仮定する。フレーム保持確率を考慮して、端末 i のプライマリ送信移行確率は、

$$\alpha_i = q_i Z_i \pi_{0_i} \quad (17)$$

と表せる。したがって、端末 i のセカンダリ送信確率は

$$\beta_i = \alpha_{i-1} = q_{i-1} Z_{i-1} \pi_{0_{i-1}} \quad (18)$$

と表せる。destination-based モードにおける無線全二重通信マルチホップネットワークの重要な特徴として、端末 i のプライマリ送信回数と端末 $i+1$ のセカンダリ送信回数は等しいと考えられる。ここで端末 i の 1 フレーム送信成功までの再送回数を

$$R_i = 1 + \gamma_i + \gamma_i^2 + \gamma_i^3 \cdots = \frac{1}{1 - \gamma_i} \quad (19)$$

と表せることから、Basic 送信回数における半二重送信回数の比は、

$$\Omega_i = \frac{\lambda_i \Delta_i R_i - \lambda_{i+1} (1 - \Delta_{i+1}) R_{i+1}}{\lambda_i \Delta_i R_i} \quad (20)$$

と表せる。無線半二重通信マルチホップネットワークを想定すると、 $\Delta_i = 0$ および $\beta_i = 0$ であるため、 $\Omega_i = 1$ となる。つまり、全ての通信が半二重通信であることを示し、式 (20) は半二重通信および全二重通信の両方を表現している。

3.2.2 衝突率

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 [11]。 (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 [11] より protocol hidden-node collision による端末 i のフレーム衝突率は、

$$\gamma_i^{(1)} = \frac{a X_{BA_{i+2}}}{1 - X_{i+1}} \quad (21)$$

と表せる。ここで $a = \text{DATA}/(\text{DIFS} + \text{DATA} + \text{SIFS} + \text{ACK})$ 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。これは端末 i が Basic 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 $d = \text{DATA}/\sigma$ より小さい場合に発生する [13]。したがって、physical hidden node collision による端末 i のフレーム衝突率は、

$$\gamma_i^{(2)} = \frac{q_{i+2} Z_{i+2} \sum_{k=0}^d \pi_{k_{i+2}}}{1 - X_{i+1}} \quad (22)$$

と表せる。これらの衝突は独立であるため、端末 i の衝突率は、

$$\gamma_i = \gamma_i^{(1)} + \gamma_i^{(2)} \quad (23)$$

と表せる。

3.3 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

$$O = E_0 = E_1 = \cdots = E_{H-1} \quad (24)$$

を満たす (フロー制限) [11]。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することができる。式 (6), (9), (15), (18), (20), (23), (24) より $7H$ 個の代数方程式が得られる。これらの代数方程式には X_i , λ_i , Δ_i , Ω_i , β_i , γ_i , E_i ($i = 0, 1, 2, \dots, H-1$) の $7H$ 個の変数が含まれる。したがって、 O を与えることで、これらの代数方程式を数値的に解くことができる。本解析ではこの数値計算にニュートン法を用いた。

4. シミュレーション評価

本章ではシミュレーション結果との比較によって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。図 2 に示す FD MAC の動作をネットワークシミュレータへの実装を行なった。このオリジナルネットワークシミュレータのベースプログラムは著者らによって構築され、その妥当性は ns-3 シミュレーター [15] との比較から確認している。FD MAC の本質的な動作を考慮したマルコフ連鎖モデルと無線マルチホップネットワークにおけるエアタイム解析手法を統合するという解析戦略の有効性を確認するため FD MAC を実装したネットワークシミュレータでは DCF におけるバイナリーバックオフの動作を考慮していない。バイナリーバックオフを考慮した FD MAC と無線マルチホップネットワークへの影響については今後の研究課題としている。

図 5 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 5 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 $\beta_i = 0$, ($i = 0, 1, \dots, H-1$) として導出している。図 5 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 6 にホップ数に対する最大スループットを示す。図 6 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

表 1 シミュレーション諸元

Data rate	18 Mbps
ACK bit rate	12 Mbps
HEADER	36 μ sec
ACK	32 μ sec
SIFS time (SIFS)	16 μ sec
DIFS time (DIFS)	34 μ sec
CWmin	128
slot time (σ)	9 μ sec
Distance of each node	45 m
Transmission range	60 m
Carrier-sensing range	60 m

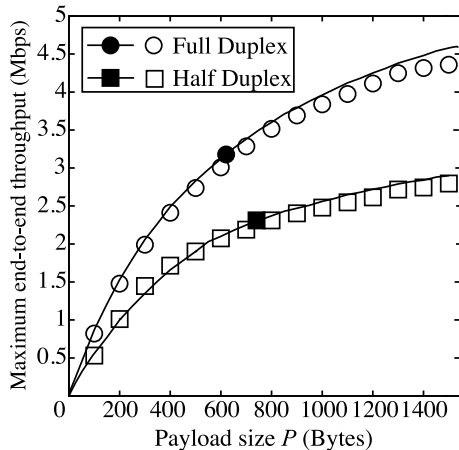


図 5 4 ホップネットワークにおけるペイロードサイズに対する最大スループット.

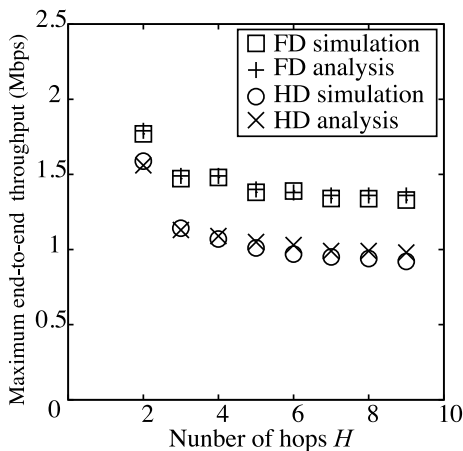


図 6 ホップ数に対する最大スループット.

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。

5. 終わりに

本稿では、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 を考慮した解析モデルを統合することにより、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を提案した。本稿で得られる解析モデルにより、任意のホップ数および任意のペイロードサイズに対する直線状無線全二重通信マルチホップネットワークの最大スループットを理論的に導出した。計算機によるシミュレーション結果との比較により、本解析モデルの妥当性を確認し、半二重通信環境との比較により、全二重通信マルチ

ホップネットワークの有効性を確認した。

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] R. D. Mohammady, M. Y. Naderi, K. R. Chowdhury, "Performance analysis of CSMA/CA based medium access in full duplex wireless communication," *IEEE Trans. Mobile Comp.*, vol. 15, no. 6, June 2016.
- [2] R. Liao, B. Bellaleta, and M. Oliver, "Modeling and enhancing full-duplex MAC for single-hop 802.11 wireless networks," *IEEE Trans. Commun. Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 349-352, Aug. 2015.
- [3] D. Kim, H. Lee, and D. Hong, "A survey of in-band full-duplex transmission: from the perspective of PHY and MAC layers," *IEEE communication survey tutorials*, vol. 17, no. 4, fourth quarter 2015.
- [4] 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.
- [5] W. Cheng, X. Zhang, and H. Zhang, "RTS/FCTS mechanism based full-duplex MAC protocol for wireless networks." *Globecom Workshops*, 2013 IEEE.
- [6] Elaheh Askari, Sonia Aissa, "Single-band full-duplex MAC protocol for distributed access networks," *IET Commun.*, 2014, Vol. 8, Iss. 10, pp. 1663-1673
- [7] 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.
- [8] Y. Sugiyama, K. Tamaki, S. Saruwatari, and T. Watanabe, "A wireless full-duplex and multi-hop network with collision avoidance using directional antennas," in *Proc. 7th Int. Conf. Mobile Comput Ubiquitous etw.* 2014, pp. 38-43.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] The network simulator - ns3, <http://www.nsnam.org>