

## 競合方式 MAC プロトコルにおける送信端末から 2 ホップ先の端末の影響

重安 哲也<sup>†</sup>(正員)                      松野 浩嗣<sup>††</sup>(正員)  
森永 規彦<sup>†</sup>(正員:フェロー)

Effect of Terminals 2-hops away from Transmitting Terminal on Contention Based Media Access Control Protocol

Tetsuya SHIGEYASU<sup>†</sup>, Hiroshi MATSUNO<sup>††</sup>, Members, and Norihiko MORINAGA<sup>†</sup>, Fellow

<sup>†</sup> 広島国際大学社会環境科学部情報通信学科, 呉市

Department of Information Technology, Hiroshima International University, 5-1-1, Hiro-koshingai, Kure-shi, 737-0112 Japan

<sup>††</sup> 山口大学理学部自然情報科学科, 山口市

Faculty of Science, Yamaguchi University, 1677-1, Yoshida, Yamaguchi-shi, 753-8512 Japan

あらまし 競合方式の MAC プロトコルでは隠れ端末の存在がスループットの低下を招く。隠れ端末となる可能性のあるのは送信端末から 2 ホップ先の端末である。本論文では, CSMA におけるこの端末の存在割合とスループットの関係性を明らかにする。

キーワード MAC プロトコル, スループット性能, CSMA, 並行送信

### 1. まえがき

競合方式の MAC プロトコルでは, 送信しようとする端末は隣接する端末の通信状況をキャリアセンスなどの方法により参照したうえで自身の送信動作を決定する。このとき, 送受信範囲外に存在する端末の状況は参照されないため, これらの端末と同時刻に送信を行えば, パケットの衝突が起こる。この現象によってスループットの低下を招く問題が隠れ端末問題である [1] ~ [3]。

この隠れ端末問題の発生する状況をより詳しく調べるため, 送信端末を T とし, この T からみたその他の端末の位置関係を以下のように分類する。

- (1) 端末 T から 1 ホップ先の端末
- (2) 端末 T から 2 ホップ先の端末
- (3) 端末 T から 3 ホップ以上の端末

端末 T が送信前に状況を参照するのは上記 (1) に属する端末である。そのため, 端末 T はこれらの端末と同時刻に送信を行うことはなくパケットの衝突を回避することができる<sup>(注1)</sup>。また (2) (3) に属する端末の状況はともに端末 T から参照されないが (3) の端末は端末 T と同時刻に送信を行ったとしてもパケットは衝突しない。結果として, 端末 T とのパケット衝

突を引き起こす可能性があるのは (2) に属する端末のみとなる。

以上のように, 送信端末から 2 ホップ先の端末がパケットの衝突を引き起こす可能性があり, スループットを低下させる。しかし, 文献 [5] で指摘されているように送信端末から 2 ホップ先の端末は送信端末と同時刻に送信を成功させ, スループットを上昇させる場合もある。本論文の目的はこのような送信端末から 2 ホップ先の端末がスループットへ及ぼす 2 種類の影響について調べることである。特に今回は, 代表的な競合方式の MAC プロトコルである CSMA [4] を取り上げ (1) (2) の端末のみが存在するネットワーク<sup>(注2)</sup>において, 2 ホップ先の端末の存在割合が及ぼすスループットへの影響を明らかにする。

## 2. ネットワークの構成と並行送信

### 2.1 無線ネットワークの構成

本論文では, PRN (Packet Radio Network) を文献 [1] で定義される hearing graph と同様の手法で表現する。まず, PRN 中の各端末をグラフ  $G = (V, E)$  のノードに対応させる (ここで  $V$  はノードの集合,  $E$  はエッジの集合)。次に, 任意の二つの端末間で双方向に通信が可能であるときにこれらに対応するノード  $u, v$  間にもエッジを引く。このようにして作成されたグラフでは, 端末間距離の概念は導入されていないが, 本論文では端末間の位置関係から受ける影響のみを純粋に評価するためにこのモデルを使用する。

### 2.2 連結率

連結率 (connection ratio) は PRN 中の任意の端末に着目したときに, その他の端末のうちで隣接端末となっているものの割合を表すが, これを用いると隣接端末と 2 ホップ先の端末のみを含む PRN を容易に生成することができる [5]。連結率は以下のように定義される。

[定義 1] (連結率) あるグラフ  $G = (V, E)$  において, ノード集合  $V$  中の任意のノード  $v$  に対し,  $v$  に隣接するノードの個数が  $\alpha(|V| - 1)$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) であるとき, このグラフの連結率は  $\alpha$  であるという。

図 1 の例では, どの端末に対しても他の 10 個の端末のうち, 4 個が隣接端末となっているので, この連結率は 0.4 となる。

(注1): 伝搬遅延時間内に送信が起こることによってパケットの衝突は起こりえるが, ここではそれは考えない。

(注2): (3) に属する端末は, 評価するプロトコルの性質や特徴に関係なく送信を成功させてしまい, 正確な評価の妨げになるためこれを排除する。

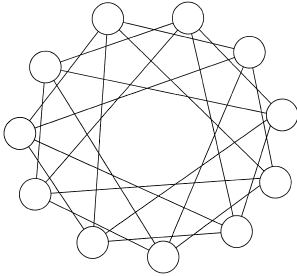


図1 連結率が0.4のグラフの例  
Fig. 1 A graph whose connection ratio=0.4.

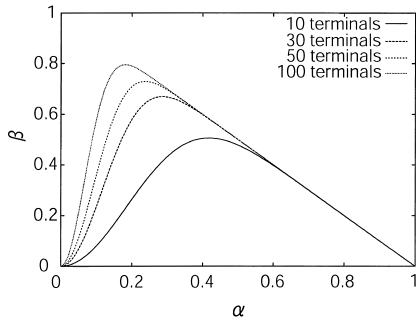


図2 連結率と2ホップ先の端末の存在割合の関係  
Fig. 2 Relationship between connection ratio and  $\beta$ .

2.3 2ホップ先の端末の存在割合と連結率との関係  
あるPRNの連結率を $\alpha$ 、PRN中の任意の端末 $v$ から2ホップ先の端末集合を $D_2(v)$ とする。文献[5]の定理1では、 $|D_2(v)|$ を以下のように求めている。

[定理1][5] 連結率 $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$ のグラフ $G=(V, E)$ を考える。任意のノード $v \in V$ に対し、このノードから2ホップ先の端末の個数は

$$|D_2(v)| = (|V|-1)(1-\alpha)[1-(1-\alpha)^{\alpha(|V|-1)}].$$

で与えられる。

PRN中の端末数 $|V|$ が10, 30, 50, 100の場合に連結率 $\alpha$ を変化させたときの2ホップ先の端末の存在割合 $\beta$ のグラフを図2に示す(2ホップ先の端末の存在割合は $\beta = \frac{|D_2(v)|}{|V|-1}$ としている。)同図において、連結率が高い間は $1-\alpha = \beta$ が成り立っていることが分かる。これが成り立つ区間の連結率をもつPRNでは隣接端末と2ホップ先の端末のみから構成されている(すなわち、3ホップ以上の端末が存在しない)<sup>注3)</sup>。また、端末数が多くなるに従って一致する区間は拡大する。

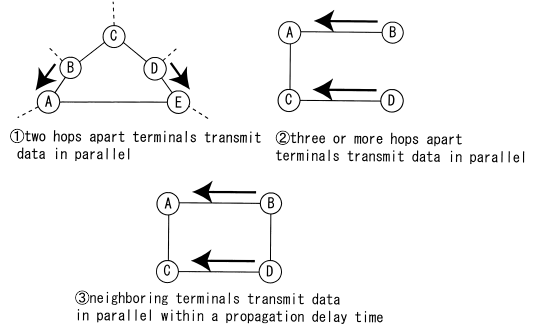


図3 並行送信の分類  
Fig. 3 Variety of parallel transmission.

### 2.4 並行送信

PRN中に直接通信を行うことのできない端末が存在する場合、キャリアセンスが行き届かないために同一時刻において複数の送信が行われる。隠れ端末問題はこの並行送信が行われることによって生じるパケットの衝突であり、スループットが低下する原因となる。逆に、同時に複数の送信が衝突なく送受信され、スループットが上昇する場合もある。これは、ネットワークが疎になったため並行送信を行っても衝突する可能性が低くなるからであると考えられる。

並行送信を衝突なく行うことのできる場合を分類し、図3に図示する。

- ① 2ホップ先の端末と並行して送信する場合
- ② 3ホップ若しくはそれ以上先の端末と並行して送信する場合
- ③ 隣接する端末と伝搬遅延時間内に並行して送信を開始する場合

前述のように、 $1-\alpha = \beta$ が成り立つ区間の連結率をもつネットワークには、3ホップ以上先の端末は存在しないため、上記のうち②を除いた①、③がおこり得る並行送信となる。

### 3. non-persistent CSMAの性能評価

#### 3.1 2ホップ先の端末の存在割合の変化とスループットの関係

2ホップ先の端末の存在割合の変化がスループットへ及ぼす影響を計算機シミュレーションにより評価した。評価用のネットワークとして50端末からなるものを $\alpha$ を $(0.4 \leq \alpha \leq 1)$ の間で0.1ずつ変化させ7種類生成した。図2から、この範囲の $\alpha$ に対して

(注3): 任意の端末に対して、 $\alpha$ はその端末の隣接端末の割合、 $\beta$ は2ホップ先の端末の割合であることに注意。

は  $\beta = 1 - \alpha$  が成り立つので、この場合の 50 端末からなるネットワークには 3 ホップ以上先の端末が存在しないことに注意されたい。なお、このとき  $\beta$  は ( $0 \leq \beta \leq 0.6$ ) となる。トラフィック  $G$  をパケット時間長当りの新しく生じたパケットと再計画されて生じたパケットの総和とする(このとき、生じたパケットはすべてが送信されるとは限らず、生じた際にチャンネルがビジーであると判断された場合、そのパケットは送信されずに再計画される<sup>(注4)</sup>)。本シミュレーションでは、このようなトラフィックをランダム変数を用いて擬似的に各端末から発生させている。更に、同一端末内に複数のパケットが発生することを避けるためにトラフィック 50 以下の場合においてシミュレーションを行ったが、図 4、図 5 のシミュレーション結果では、どのグラフについてもピークを十分に過ぎたところまでデータが得られていることに注意されたい。また、これらのパケットの生起は単位時間当たり平均  $G$

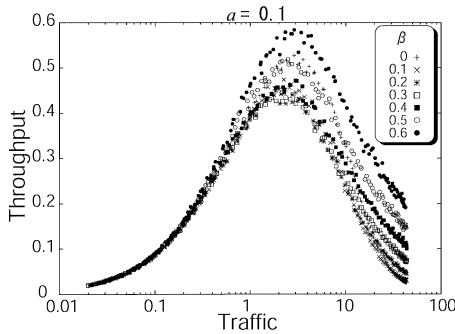


図 4 2 ホップ先の端末の存在割合とスループット特性の関係 ( $a = 0.1$ )

Fig. 4 Throughputs with various  $\beta$ s ( $a = 0.1$ ).

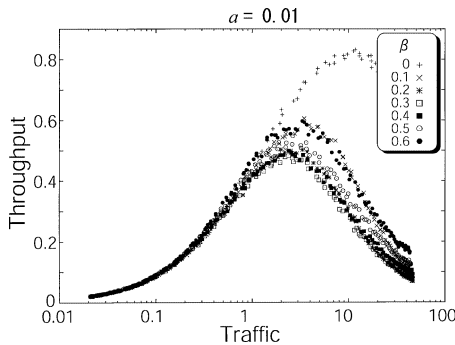


図 5 2 ホップ先の端末の存在割合とスループット特性の関係 ( $a = 0.01$ )

Fig. 5 Throughputs with various  $\beta$ s ( $a = 0.01$ ).

回のポアソン分布に従うものとする。結果の 1 プロットは 5,000 パケットの送受信が成功するまでの時間をもとにスループットを求めている。

正規化伝搬遅延時間  $a$  が 0.1, 0.01 の二つの場合のシミュレーション結果をそれぞれ図 4, 図 5 に示し、以下に特徴を述べる (2 ホップ先の端末の存在割合を  $\beta$  とする)。

図 4 (伝搬遅延時間  $a = 0.1$ ) の場合、

- $\beta = 0$  のネットワークに比べ、 $\beta$  が ( $0.1 \leq \beta \leq 0.4$ ) の割合で存在するネットワークではスループットが低下している。

- $\beta = 0.6$  の場合は、逆に  $\beta = 0$  の場合に比べてスループットが高くなっている。

- $\beta$  が ( $0 \leq \beta \leq 0.3$ ) の間、 $\beta$  の増加に伴い、スループットは低下していく。しかし、逆に ( $0.3 < \beta \leq 0.6$ ) の間、 $\beta$  の増加に伴い、スループットは上昇していく。

図 5 (伝搬遅延時間  $a = 0.01$ ) の場合、

- $\beta = 0$  のネットワークに比べ、 $\beta$  が ( $0.1 \leq \beta \leq 0.6$ ) の割合で存在するネットワークでは、スループットの低下が起こる。

- 伝搬遅延時間  $a = 0.1$  の結果と同様に  $\beta$  が ( $0 \leq \beta \leq 0.3$ ) の間、 $\beta$  が増加するに伴い、スループットは低下していき、 $\beta$  が ( $0.3 < \beta \leq 0.6$ ) の間、 $\beta$  が増加するに伴い、スループットは上昇していく。

図 4, 図 5 とともに、( $0 \leq \beta \leq 0.3$ ) の間で、 $\beta$  が増加するに従いスループットは低下するのは、2 ホップ先の端末が隠れ端末問題の発生を増加させるからであると考えられるが、 $\beta$  が ( $0.3 < \beta \leq 0.6$ ) の間、 $\beta$  が増加するに伴い、スループットが上昇するのは、並行送信が多く成功するようになるからであると考えられる。そこで、次節は  $\beta$  と並行送信の関係に焦点をあてる。

### 3.2 2 ホップ先の端末の存在割合と並行送信の関係

図 6, 図 7 に実際に送受信が成功したパケットのうち、その他のパケットと同時刻に並行して送信されていたものの割合を示す。これらから、2 ホップ先の端末の存在割合が増加すると、ネットワーク中で並行送信が多く成功するようになることが分かる。例えば 2 ホップ先の端末の存在割合が 0.6 の場合、送受信が成功したパケットのうちの 5 割が並行送信となり得ることが両図から読みとれる。

(注4): これは、CSMA を提案した文献 [4] と同一の条件としている。

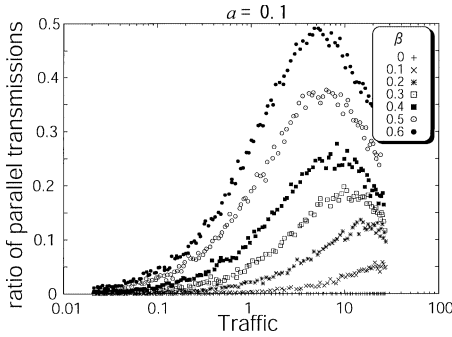


図 6 並行送信の割合 ( $a = 0.1$ )  
Fig. 6 Ratio of parallel transmissions ( $a = 0.1$ ).

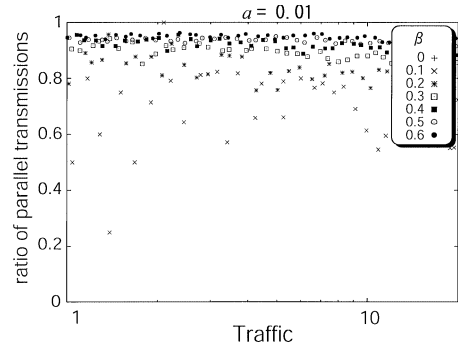


図 9 2 ホップ先の端末の割合と並行送信の関係 ( $a = 0.01$ )  
Fig. 9 A relationship between ratio of two-hops away terminals and a ratio of parallel transmissions ( $a = 0.01$ ).

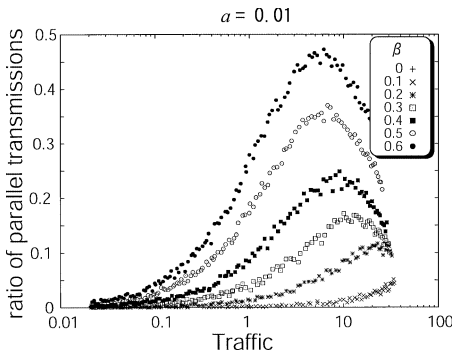


図 7 並行送信の割合 ( $a = 0.01$ )  
Fig. 7 Ratio of parallel transmissions ( $a = 0.01$ ).

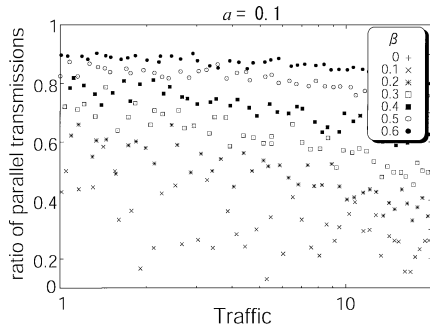


図 8 2 ホップ先の端末の割合と並行送信の関係 ( $a = 0.1$ )  
Fig. 8 A relationship between ratio of two-hops away terminals and a ratio of parallel transmissions ( $a = 0.1$ ).

図 8, 図 9 では, シミュレーション中に成功した平行送信のうち, 図 3 の①に該当するものの割合を示している. 両図ともに  $\beta$  が低い場合にばらつきが大きくなっているが, これはもともと成功した並行送信数が少ないためである. これらの結果から,  $\beta$  の値が増加

に伴って, 2 ホップ先の端末と並行して送信を頻繁に行うようになっていることが分かる.

#### 4. むすび

本論文では, 代表的な競合方式の MAC プロトコルである CSMA において送信端末から 2 ホップ先の端末の存在割合がスループットへ及ぼす影響を考察した.

競合方式の MAC プロトコルでは, 送信端末から 2 ホップ先の端末の存在は I. 隠れ端末問題を引き起こし, スループットを低下させる, II. 並行送信を成功させることによりスループットを上昇させるといったそれぞれ負と正の影響をもつ.

本論文では上記の 2 種類の影響を調査した計算機シミュレーション結果によって, 2 ホップ先の端末の存在割合の低い場合は, I. のスループットを低下させる影響が強く出るが, 逆にこの存在割合が高いネットワークでは II. のスループットを上昇させる影響が強く出ることを示した. 今後は, 隠れ端末対策として送信端末から 2 ホップ先の端末の送信を抑制するような様々な競合方式の MAC プロトコル (例えば MACA [2] がこれに該当する) において, 2 ホップ先の端末がスループットへ及ぼす影響を調査していく予定である.

#### 文 献

- [1] F.A. Tobagi and L. Kleinrock, "Packet switching in radio channels: Part II—The hidden terminal problem in CSMA and busy-tone solution," IEEE Trans. Commun., vol.COM-23, pp.1417–1433, 1975.
- [2] P. Karn, "MACA—A new channel access method for packet radio," ARRL/CRRL Amateur Radio 9th, Computer Networking Conference, pp.134–140, 1990.
- [3] V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenker, and L. Zhang, "MACAW: A media access protocol for wire-

- less LAN's," Proc. ACM SIGCOMM '94, pp.212-225, 1994.
- [4] L. Kleinrock and F.A. Tobagi, "Packet switching in radio channels: Part I — Carrier sense multiple access modes and their throughput delay characteristics," IEEE Trans. Commun., vol.COM-23, pp.1400-1416, 1975.
- [5] T. Shigeyasu, H. Ishinaka, and H. Matsuno, "A relationship between densities and numbers of hidden stations of packet radio networks," Lecture Notes in Computer Science vol.2343 (The 16th International Conference on Information Networking), pp.618-627, Springer, 2002.
- (平成 15 年 6 月 30 日受付, 8 月 12 日再受付)
-