

PTMP 型アクセスネットワークにおける Synchronous CSMA/v-MCA 方式へのフレーム先行送信制御の適用

森 谷 修[†] 小 林 浩^{††}
森 靖^{††} 高 橋 武 宏^{††}

最短フレーム長に依存することなく任意のネットワーク長を設定でき、また衝突発生確率を低減すべく負荷トラヒックに応じて複数個の衝突回避 (CA) スロットを適応的に設ける Synchronous CSMA/v-MCA 方式では、ネットワーク長が長くなるほど往復伝送遅延時間の介在による性能の劣化が顕著になる。提案するフレーミング送信方式は、上りチャネルの空き時刻を予測し、同時刻をめがけて CA フレームや MAC フレームを先行送信させようとするものである。理論解析とシミュレーション結果から、従来方式に比べ 40 km のネットワーク長において 2 倍以上の高スループット特性が得られることを示した。さらに、遅延時間の増大を抑えつつ、より高いスループット特性を得るうえでの上限 CA スロット数の適正化についても議論した。

Precedence Transmission of Frames Incorporating Synchronous CSMA/v-MCA on PTMP Access Networks

OSAMU MORIYA,[†] HIROSHI KOBAYASHI,^{††} YASUSHI MORI^{††}
and TAKEHIRO TAKAHASHI^{††}

This research presents a contention-based access system in which the number of variable collision avoidance (CA) slots is controlled adaptively according to the volume of traffic in order to reduce the probability of a collision. This system can be operated over a network of any length without the use of frame-length restrictions. However, a potential drawback is the rapid degradation of throughput performance due to round trip time (RTT), which is proportional to the network length. The proposed scheme, adapted to synchronous CSMA/v-MCA systems, is to precede transmission of CA and MAC frames in order to minimize the time wasted on upstream channels. Data from both theoretical analyses and computer simulations indicate that the system provides throughput performance that is at least twice the performance of the conventional system in networks 40 km in length. Furthermore, the assignable maximum number of CA slots to achieve high throughput while maintaining low latency is also discussed.

1. ま え が き

近年、ADSL や光ファイバなどを用いた常時接続型の高速度インターネットアクセスサービスが、先進国の都市部や市街地を中心に急速に普及してきている。今後は人口密度の少ない郊外や過疎地さらには発展途上国などへの展開、すなわちデジタルデバイド解消のためのアクセスネットワークの整備が課題となっている。こうした地域で、短期間で経済性良くアクセスネッ

トワークの整備を進めていくには、既設の電話線や光ファイバなどの有線伝送媒体はもとよりマイクロ波帯などの無線伝送媒体の利用、すなわち劣悪な伝送環境での運用も考慮のうえ、半径数十キロメートルにも及ぶ広範囲なエリアで、伝送媒体を効率良く共有しあう新たなアクセス方式の開発が必要である。

HFC (Hybrid Fiber and Coaxial) や加入者無線アクセス (FWA; Fixed Wireless Access) など、広帯域な伝送媒体を複数の加入者で共有しあう PTMP (Point-To-MultiPoint) 型アクセスネットワークにおいては、長距離伝送にともなう伝送遅延時間の増大を考慮しつつ資源共有化による伝送効率向上を図るため、たとえば HFC における DOCSIS (Data-Over-Cable Service Interface Specifications)^{3),4)} 方式や、衛星通

[†] 株式会社東芝社会システム社
Social Systems Company, Toshiba Corporation

^{††} 東京電機大学情報環境学研究所
Graduate School of Information Environment, Tokyo
Denki University

信における DAMA (Demand Assignment Multiple Access)⁶⁾ 方式などが提案されてきた⁵⁾。また近年では無線アクセスの標準として、IEEE802.16 標準 (WiMAX)¹⁾ が標準化されており、広帯域な無線アクセスに注目が集まっている。

これらの方式は 2~4 msec 程度の予約周期の中で送信手続きを行い、コネクションを確立して通信を行うことがベースとなっているため、最初のコネクション確立に時間がかかることや、急激なアクセスの増減があると性能が低下したり、コネクションを確立しにくくなったりするという問題があった。

Synchronous CSMA/CD (以下、S-CSMA/CD と略) 方式は、イーサネットとの整合性に優れた CSMA 系のアクセス方式を採用しており、アクセス遅延時間が少ないという特徴を活かしながら、最大ネットワーク長を最短パケット長 (最短 MAC フレーム長) に依存することなく任意に設定することを可能とするものであった²⁾。特に、アクセス遅延時間が少ないことは、TCP ウィンドサイズが小さくても高速広帯域サービスを実現できることから、パケット抜けが頻発する劣悪な伝送環境にも適応しやすいことを意味する。

しかしながら、S-CSMA/CD 方式には、往復伝播遅延時間の介在にともなうアクセスの集中化と、上りペイロードの送信時間の削減という 2 つの要因の相乗によって、ネットワーク長が長くなるほどスループット特性が急速に劣化するという課題が潜んでいる。こうした事情をふまえて提案された Synchronous CSMA with Multiple CA (以下、S-CSMA/MCA と略) 方式は、衝突回避用スロット (以下、CA スロットと略) を固定的に複数個設定することによってアクセスの分散化を促し、スループット特性の改善を図ろうとするものであった⁸⁾。同方式は衝突発生確率の低減に顕著な効果があり、S-CSMA/CD 方式はもとより、短ネットワーク長領域でもこれまでの CSMA/CD 方式をも凌ぐ高い潜在能力を有する。

さらに、CA スロット数をアクセス状態に応じて適応的に制御する可変スロット (v-MCA) 方式の導入は、負荷変動に対する適応能力の向上と運用性の向上に有効なことが明らかになったものの、その性能を最大限に高めるには送信タイミングの前倒し (フライング送信) など、いくつかの課題克服が必要なことも指摘されていた⁹⁾。本稿は、フレームの送信タイミングの前倒し (フライング送信) の有用性について考察

しようとするもので、送信時のアクセス競合制御などに介在する往復伝播遅延時間の影響を排除し、ネットワーク性能の劇的な向上を図ることを目的としている。

2. PTMP 型ネットワークと Synchronous CSMA/v-MCA 方式

本稿が対象とする、1 台のハブ装置 (SCH) と複数台の加入者装置 (CPE) とで伝送媒体を共有しあう PTMP 型アクセスネットワークでは、下り方向の情報はサービスノード (インターネットとの接続ゲートウェイや電子メールサーバなどの設置サイト) 側で多重化が行われるため、アクセスネットワーク内では多重化にともなう競合制御は必要がないが、上り方向は複数の CPE からの情報送信が競合しあうため何らかのアクセス制御が必要になる。

この PTMP 型ネットワークは、対等分散型制御を基本とするイーサネットなどの LAN にはない特徴を備えている。すなわち、対等分散型のアクセス方式ではキャリア検知や衝突検出を個々の CPE が自らの責任において行うが、PTMP 型では CPE に代わって SCH がキャリア検知や衝突検出を行い、さらに MAC フレームなどの送信タイミングを精度良く制御することができる。

S-CSMA/MCA 方式⁸⁾ はこれらの特徴を利用したもので、その骨子は、

- (a) SCH へのフレーム信号の到着を所定のタイミングに同期させ、かつ SCH でのフレーム信号の受信レベルを等しくさせる、
 - (b) CPE は上り MAC フレームの送信に先立って、複数個の CA スロットの中から 1 つをランダムに選択し CA フレームを送信する CA 手続きを行う、
 - (c) SCH は CA 手続きに成功した 1 つまたは複数の CPE に対して順に MAC フレームの送信を促す、
- ことにある。

ここに (a) は、同じ CA スロットに複数の CA フレームが送信されたときに確実に衝突を検出したり、あるいは CA 手続きに成功した CPE が他の CPE からの信号と衝突しないように MAC フレームの送信タイミングを調整したりするためのベースとなるものである。(b) は、IEEE802.11 標準の無線 LAN における RTS/CTS 方式⁷⁾ と同様に、MAC フレームの送信に先立って CA 手続きを行うものであるが、この CA 手続きの窓口 (CA スロット) を複数化し、ランダムに窓口を選択させることによってアクセスを分散化さ

回線交換方式のように固定帯域を常時確保するとは限らないため、アソシエーションと呼ぶことも多い。

せ、CA 手続きにおける衝突発生確率を低減しようとするものである。さらに (c) は、1 回の CA 手続きで複数の CPE が成功した場合には、成功した CPE すべてについて MAC フレームの送信を行わせることによって、伝送媒体の利用効率の向上を図ろうとするものである。

4 個(個数一定)の CA スロットを装備した実装例を用いたシミュレーションによる方式評価によれば、比較的短い 2.5 km のネットワーク長 (SCH と最遠端の CPE 間の距離) でも最大スループットを S-CSMA/CD 方式に対して 56% 改善でき、さらに 10 km ~ 80 km の長いネットワーク長では 100% ~ 200% も最大スループットを高められることが確認されている⁸⁾。

さらに、CA スロット数を増やせば高負荷領域においてスループット特性は改善されるものの、過剰に CA スロットを設定すれば CA 手続きの成功に寄与する CA スロットの割合を低下させ、ネットワーク資源を固定的に浪費することになることに着目して、CA スロット数を瞬時トラヒックに応じて可変制御する S-CSMA/v-MCA 方式が提案された。この方式はさらに

- (d) SCH が前回の CA 手続きにおけるアクセス状態から同時アクセス数を推定し、
- (e) 次回の CA 手続きにおいて発生しうる同時アクセス数の上限を予測し、
- (f) これに危険率を乗じた予測上限危険値を CA スロット数として設定する、

ことにより衝突確率を低減させた。

その結果、前述の固定スロット方式並みのスループット特性や遅延特性を実現しつつ、CA スロットの有効利用率を高め、ひいては効率の良い安定性に富んだシステムの実現と、CA スロット数設定の自動化による運用管理上の煩雑さの回避にも有用なことが示された⁹⁾。

しかしながら、同方式においてもなおチャンネルの伝送容量の利用効率には限界がある。すなわち、ネットワークの長さ起因する往復伝播遅延時間によってチャンネルを利用できない時間が生じ、最大スループットがおさえられてしまうからである。また、同提案では CA 手続きで SCH が設定可能な CA スロット数の上限個数(以下、上限スロット数という)の適正值が明らかにされていない。設定可能なスロット数に制限がなければ、過負荷状態が継続したとき、CA スロット数は限りなく増加することになる。これはスループット特性を限りなく改善するものの、CA 手続きに要する時間、すなわち遅延時間も限りなく増大することを意味する。スループット特性の改善と遅延時間増

大の抑制という相反する要素のバランスのとれた上限スロット数の設定が、上記提案方式の実用化にあたっての課題の 1 つとして残っていた。本稿はこれらの課題解決を行おうとするもので、前者については上下のチャンネルの帯域が分離されている特徴を利用して、上りチャンネルの空き時刻を SCH が予測し、同時刻を目標けて CA フレームや MAC フレームの先行送信を指示する flying S-CSMA/v-MCA 方式の提案によって、また後者は同提案に引き続く議論の中で適正值が示されよう。

3. Flying S-CSMA/v-MCA 方式の提案

3.1 方式の概要

フレームの先行送信制御を適用した flying S-CSMA/v-MCA 方式の骨子は、次に示すようなものである。

- (A) SCH はネットワークの最大往復伝播遅延時間 T_{RTT} および、CA 手続きの際に申告させる上り MAC フレーム長などをもとに、SCH でのフレーム受信終了時刻、すなわち上りチャンネルの空き時刻 T_{idle} を予測する。
- (B) SCH は予測した " T_{idle} " を同時刻より T_{RTT} 以上前に下りチャンネルを使って広告し、所望の CPE にフレーム送信を指示する。
- (C) フレーム送信を指示された CPE_i は、時刻 $(T_{idle} - T_{ui})$ にフレームの送信を開始する(フライング送信)。ただし、 T_{ui} は CPE_i から SCH までの上り伝播遅延時間である。

これは、CA 手続きにおける CA フレームやその後の MAC フレームの送信指示に介在していた往復伝播遅延時間問題を排除する、すなわち PTMP 型アクセスネットワークへの適用を前提とした S-CSMA/v-MCA 方式におけるネットワーク長の増大にともなうスループットの急激な悪化や遅延時間の増大を、逆に PTMP 型ネットワークの特徴を用いて解決しようとすることを意味している。

以下に、上りチャンネル空き時刻 T の予測について考察する。上下のチャンネルの帯域の分離を前提とする S-CSMA/v-MCA 方式では、上り伝送路においてチャンネルが使用される(もしくは使用される可能性がある)のは、① CA フレーム(CA スロット)、② 上り MAC フレーム、③ 送信クロックのずれなどを補正しネットワーク全体の同期を取るための時刻同期フレーム(AS フレーム)の 3 つである。このうち、③ の AS フレ

本稿でいう "flying start" とは、自転車競技などで用いられている助走発進に近い意味合いで、陸上競技などで用いられるいわゆるフライング (premature start) を意味するものではない。

ムはあらかじめ設定された一定の周期で送信されるフレームであり予測は簡単であるが、①と②はその時点でのトラフィックにより刻々と変化するため、以下のような手段によって予測する必要がある

① CA フレーム

CA 手続きでは、上りのアクセス状態をもとに SCH が複数個の CA スロットを用意するが、 q 回目の CA 手続きでのスロット数 n_q は、文献 8) で示されているように次式で算出される。

$$\hat{k}_q = \tilde{k}_{q-1} \times \frac{T_{CAq}}{T_{CAq-1}} \quad (1)$$

$$n_q = \lceil \alpha \cdot \hat{k}_q \rceil \quad (2)$$

ただし、 \hat{k}_q 、 \tilde{k}_{q-1} 、 T_{CAq} 、 α 、 $\lceil \cdot \rceil$ は、各々 q 回目の CA 手続きにおける同時アクセス数の予測値、 $q-1$ 回目の同時アクセス数の推定値、 $q-1$ 回目と q 回目の CA 手続き間の時間間隔、予測値と実際値の隔たりを補う予測上限危険値、四捨五入による整数化である。したがって、CA スロット長 (= CA フレーム長) を F_{CA} とすると、CA 手続き時間は $n_q \cdot F_{CA}$ となる。

送信すべき MAC フレームを持つ CPE はこの中の 1 つをランダムに選択して CA フレームを送信するが、CA 手続きの開始時刻、すなわちチャネルが空きになるのは直前の CA 手続きに成功した複数個の MAC フレーム中の最後のフレームの最終ビットが SCH に到着する時刻である。したがって、この直後に最初の CA スロットを選択した CPE からの CA フレームの 1 ビット目が到着するようにフライング送信させれば、無駄な往復伝播遅延時間を介在させることなく、チャネル利用効率を高くすることができる。

② MAC フレーム

MAC フレームの送信は、直前の CA 手続き結果に基づき、SCH から下りチャネルにおいて周期的に通知される状態表示信号 (SI 信号: Status Indicator) で全 CPE に通知される「MAC フレーム送信許可」信号が契機になる。したがって、最初に送信される MAC フレームの 1 ビット目は、直前の CA 手続きが終了し、下り「MAC フレーム送信許可」信号が送信されてから T_{RTT} より早く SCH に到着させることはできない。しかし、以降の MAC フレームであれば、SCH は CA 手続きで申告された MAC フレーム長から MAC フレームの最終ビットの到着時刻を予測することができる。これを該当する CPE に通知すれば、2 番目以降の MAC フレームをフライング送信させることが可能となる。

なお、CA 手続き直後の最初の MAC フレームのフ

ライン送信については、前回の CA 手続き ($q-1$ 回目) で成功した MAC フレーム長の合計が $[n_q \cdot B_{CA} + T_{RTT}]$ より大きな場合、これらの送信中に q 回目の CA 手続きを割り込ませることによって可能にはなるが、MAC フレームの送信順序の入れ替えやフラグメント化などが必要になり、動作メカニズムは複雑で実装も難しくなることは否めない。

3.2 フライング送信方式の具体化

以上をふまえると、フライング送信方式は次の 3 つの方式が考えられる。

フライング方式 1: CA フレームのみフライング送信させる方式

フライング方式 2: CA フレームと 2 番目以降の MAC フレームをフライング送信させる方式

フライング方式 3: すべてのフレームをフライング送信させる方式

図 1、図 2、図 3 は、各々これまでの Synchronous CSMA/v-MCA 方式 (フライングなし)、フライング方式 1、2 の実装例と動作メカニズムを表したものである。なお、動作メカニズムが複雑なフライング方式 3 の記載は省略した。

具体的な動作メカニズムは、図 1 (フライングなし) において次のとおりである。

1. SCH が CA スロット数の通知と CA フレームの送信を促す SI 信号を送信すると、同信号は下り伝播遅延時間 Td_i 後に CPE_i に到着する。
2. 送信すべき MAC フレームを保有する CPE_i が、CA スロットの中の 1 つをランダムに選択し、所定の送信タイミング Δt_i (最大伝播遅延時間から $(Td_i + Tu_i)$ を差し引いた値) で CA フレームを送信すると、上り伝播遅延時間 Tu_i 後に選択した CA スロット位置に到着する。同様に、 CPE_j と CPE_k とから CA フレームが送信される。
3. SCH では送信された CA フレームのビット誤りを検査し、誤りが検出されなかった CA フレームの送信を送信成功と判定し、誤ったものを送信失敗と判定する。
4. SCH は SI 信号を使って、アクセス結果をビットマップ形式 (図 1 の例では "1000") で通知する。
5. これを受信した CPE_i は CA 手続きに成功したことを知り、所定の送信タイミング (Δt_i) 後に MAC フレームの送信を開始する。
6. 一方、 CPE_j と CPE_k は受信した SI 信号 (3 ビット目が CA 手続き成功を表していないこと) から衝突発生を知り、バックオフ処理に

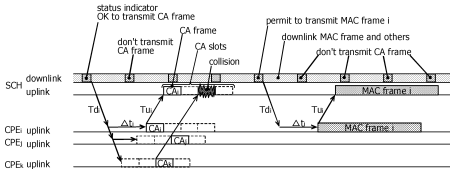


図 1 S-CSMA/MCA (フライングなし) の実装例と動作メカニズム
Fig. 1 An implementation of S-CSMA/MCA.

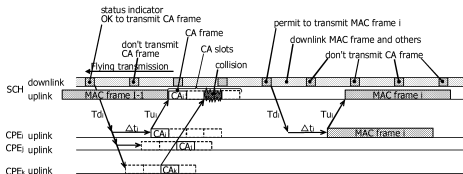


図 2 フライング方式 1 の実装例と動作メカニズム
Fig. 2 An implementation of precedence transmission (Type 1).

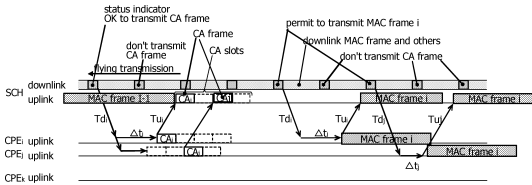


図 3 フライング方式 2 の実装例と動作メカニズム
Fig. 3 An implementation of precedence transmission (Type 2).

移行する。

7. SCH は、 CPE_i からの CA フレームで通知されていた MAC フレーム長をもとに、MAC フレームが上り伝送路上から消滅するまでの期間、他の CPE に対して CA フレームの送信を禁止する SI 信号を繰り返し送信する。
8. MAC フレームの消滅後、同様のプロセスが繰り返される。

これに対して、図 2 のフライング方式 1 では、上記 1. (CA 手続き) の動作開始タイミングを、前回の CA 手続きで許可した最後の MAC フレーム I-1 の送信終了時刻より、最大往復伝播遅延時間 $Td_i + Tu_i + \Delta t_i$ だけ前倒し(フライング送信)する。さらに図 3 のフライング方式 2 では、フライング方式 1 に加え、上記 4. の動作開始タイミングのうち 2 番目以降の MAC フレームの送信タイミングを最大往復伝播遅延時間前倒しする。

次に、フライングなしを含むこれらの方式について、理論上の性能限界の比較を行う。ネットワーク性能の評価指標として正規化スループット特性がよく用いられる。これは一般的に「実際に運ばれるデータの伝送速度」/「物理伝送速度」で定義されるが、本システム

では CA 手続きとその後に続く MAC フレームの送信により一連の送信動作が終了するため、これを単位として考えることとする。CA スロット数を n 、最大往復伝播遅延時間 T_{RTT} を 1 ビットあたりの伝送時間で規格化したもの(単位: bit-time、物理伝送速度が 10 Mbps のとき 100 nsec)を B_{RTT} 、同様に CA 手続きに成功した i 番目の MAC フレームの送信時間を B_{MACi} 、CA フレームの送信時間を B_{CA} とおくと、正規化スループット W は以下の各式で表すことができる。

- (1) フライングなし

$$W_{noflying} = \frac{\sum_i B_{MACi}}{B_{RTT} + nB_{CA} + \sum_i (B_{RTT} + B_{MACi})} \quad (3)$$

- (2) フライング方式 1

$$W_{flying1} = \frac{\sum_i B_{MACi}}{nB_{CA} + \sum_i (B_{RTT} + B_{MACi})} \quad (4)$$

- (3) フライング方式 2

$$W_{flying2} = \frac{\sum_i B_{MACi}}{nB_{CA} + B_{RTT} + \sum_i B_{MACi}} \quad (5)$$

- (4) フライング方式 3

$$W_{flying3} = \frac{\sum_i B_{MACi}}{nB_{CA} + \sum_i B_{MACi}} \quad (6)$$

そして、CA 手続きで SCH が用意した CA スロットすべてに 1 台ずつ CPE がアクセスしたときにスループットは最大になるが、これは方式の理論上の性能限界を与えることになる。図 4 は、後述の表 1 の基準値で各方式のネットワーク長に対する理論性能限界を求めたものである。

同図から、フライングなしとフライング方式 1 との性能の差はわずかであるが、ネットワーク長が長くなるとスループット特性は著しく低下することが、一方、フライング方式 2 とフライング方式 3 との性能の差もわずかで、ネットワーク長による性能の劣化はきわめて少ないことが分かる。

図 5 は、図 4 の条件での各方式における遅延時間を理論上求めたものである。同図からも同様にフライング方式 2 とフライング方式 3 の性能の差がわずかで

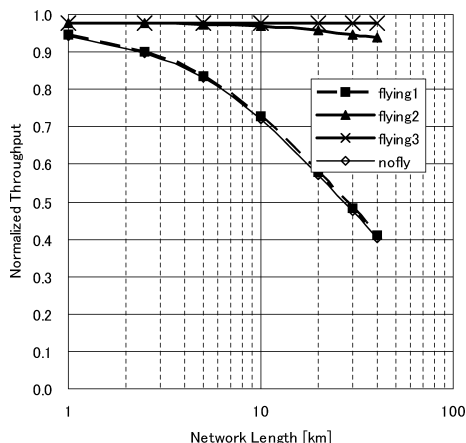


図 4 各方式のスループット性能限界の比較

Fig. 4 Maximum throughput vs. network length.

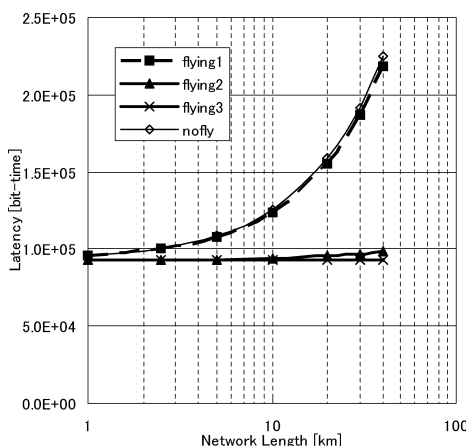


図 5 各方式の遅延時間性能 (図 4 と同一条件) の比較

Fig. 5 Latency vs. network length.

あることが分かる。なお、図 5 においてはフライング方式 3 であっても最低 10^5 [bittime] 程度の遅延時間が見られるが、これはスループット最大の仮定条件での遅延時間であるため最小値とはならない。

これより、次節で取り上げるシミュレーションによる特性評価では、フライングなしとフライング方式 2 を対象とし、ネットワーク長に依存しない理想的な性能が期待されるものの実装が複雑な方式 3 については、今後の課題として本稿ではこれ以上言及しないことにする。

3.3 シミュレーションによる特性評価

さらに、提案方式の有効性を評価するために、フライングなしとフライング方式 2 について、表 1 に示す本システムが対象領域とするネットワーク環境条件で、文献 9), 10) と同じ方法でシミュレーションを行った。

なお、シミュレーションにあたっては、負荷トラヒッ

表 1 シミュレーション条件 (本システムの対象領域)

Table 1 Key parameters on computer simulations.

パラメータ	最小値	基準値	最大値
ネットワーク長	2.5 km	10 km	40 km
短 MAC フレーム長	64 bytes		
長 MAC フレーム長	1518 bytes		
短長 MAC フレーム構成比	10 : 0	8 : 2	0 : 10
上り物理伝送速度	5 Mbps	10 Mbps	20 Mbps
上限 CA スロット数	2	32	1024
CA スロット (フレーム) 長	64 bits		
危険率	8		

クごとに乱数の初期値を変えて 5 回行いその平均値を採用した。また、以下の議論では、生起トラヒックが支配的でエンドユーザが高速広帯域性を感じ得る負荷トラヒック ($\rho < 0.6$) を通常負荷状態、衝突にともなう再送トラヒックが支配的になる負荷トラヒック ($\rho > 2.0$) を過負荷状態と定義する。

(I) スループット特性

図 6 は、ネットワーク長 2.5 km, 10 km, 40 km (他の条件は表 1 の基準値) におけるスループット特性を比較したものである。

通常負荷状態では、方式の違いやネットワーク長によらず同程度のスループットが得られるが、ネットワーク長が長くなるほど、また過負荷状態になるほどフライング方式 2 が優れた特性を示し、フライング送信の効果が顕著になることが分かる。そして、たとえばネットワーク長が 40 km のときのフライングなしでの最大スループットは $\rho = 2$ 付近で 0.36 であるのに対して、フライング方式 2 では $\rho = 4$ 付近で 0.73 を呈し、2 倍以上のスループットが得られることが分かる。この値は前述の理論性能限界を各々 10% 程度下回る値で、理論計算が良好な近似を与えることが確認される。

(II) 遅延特性

さらに、図 7 は図 6 と同じ条件での遅延特性を示したものである。

スループット特性と同様に、通常負荷状態では方式の違いやネットワーク長によらず遅延量には大きな差は見られないが、トラヒックの増加につれて CA スロットにおける衝突が増大するために、過負荷状態になるほど急激に遅延時間が増大する。そして、フライング方式 2 の方が、いずれのネットワーク長においても良好な遅延特性を示すことが確認できる。これは、過負荷状態においてはチャネルのスループットが飽和状態になるため、上りチャネルはつねに CA 手続きか MAC フレーム送信の状態になるが、フライング送信によってこれらの動作に介在していた往復伝播遅延時

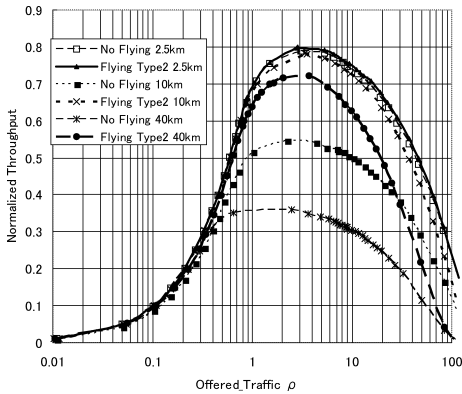


図 6 スループット特性シミュレーション結果
Fig. 6 Mean throughput vs. offered traffic.

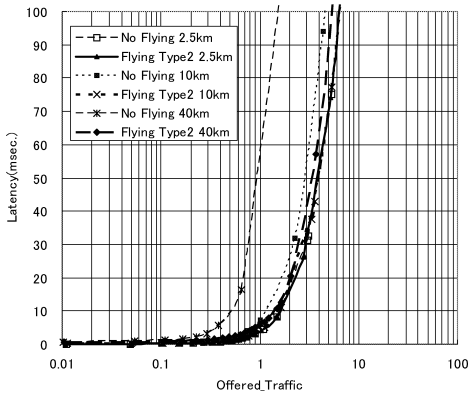


図 7 遅延特性シミュレーション結果
Fig. 7 Mean latency vs. offered traffic.

間相当の無駄な時間が取り除かれ、さらにこれにともなう CA 手続きでの衝突発生確率の低減、ひいては 2 乗バックオフ再送時間の減少という相乗効果によるものと考えられる。

3.4 上限 CA スロット数

以上の議論では、表 1 に示したように上限 CA スロット数 $n_{max} = 32$ を基準値として用いてきたが、ここでは 1 回の CA 手続きで SCH が設定しうる CA スロット数の上限値の適正値について考察する。図 8 は、フライング方式 2 について、 n_{max} を 2 から 1024 まで変化させたときの、 $\rho = 1, 2, 3$ におけるスループットの変化をシミュレーション（条件： n_{max} 以外は表 1 の基準値）により求めたものである。同図から、 n_{max} が数 10 以下の少ないところでは n_{max} を増やすことによるスループットの改善効果は大きいものの、 n_{max} がこれより多くなると効果は鈍化していくことが分かる。

一方、図 9 は同様の条件で遅延量の変化を求めた

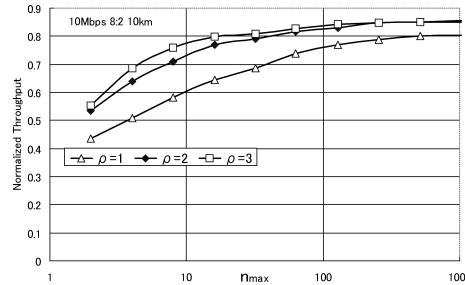


図 8 スループット-上限 CA スロット数 n_{max} の負荷特性
Fig. 8 Throughput vs. n_{max} on various offered traffic.

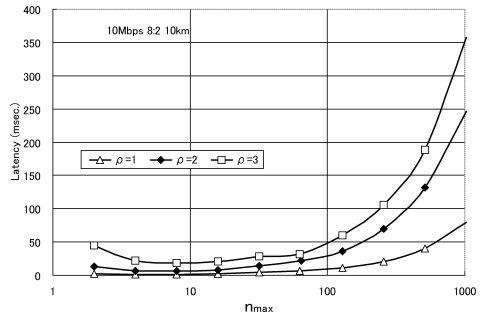


図 9 遅延時間-上限 CA スロット数 n_{max} の負荷特性
Fig. 9 Latency vs. n_{max} on various offered traffic.

ものである。 n_{max} が数 10 以上から遅延量は増大し、また数スロット以下でも遅延が増えることが分かる。前者は CA スロット数の増加によって CA 手続きあたりの MAC フレームの送信数が増え、結果として CA 手続きの間隔が長くなることによるもので、後者は負荷トラヒックに見合った CA スロットが用意されないことによって CA 手続きの際の衝突が多くなり、次回以降の CA 手続きを再度試み、その結果遅延時間が増えるためと考えられる。そして、スループットと遅延量とも、 ρ が大きくなるほど特性への影響が顕著になるが、これは前項の議論と矛盾するものではない。

さらに、図 10、図 11 は、 $\rho = 2, n_{max} = 2 \sim 128$ について、ネットワーク長や短長パケット数比、物理伝送速度を表 1 の範囲で変化させて、スループットと遅延特性の変化を比較したものである。これらから、運用環境としてネットワーク長が長いほど、短パケットの割合が多いほど、また物理伝送速度が速いほど n_{max} を多く、逆にネットワークの運用ポリシーとしてスループットよりも遅延時間を優先しようとするならば、 n_{max} は少な目に設定すべきであることが分かる。

以上から、表 1 の条件下で、より高いスループットを得つつ、遅延時間の増大を抑える適正な n_{max} は、おおむね 10~50 スロットの範囲に存在するものと推察される。こうした知見から、本稿では $n_{max} = 32$ を

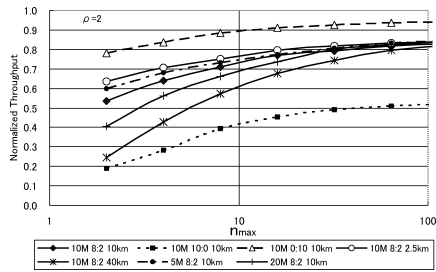


図 10 種々ネットワーク条件でのスループットの上限 CA スロット数 n_{max} 特性

Fig. 10 Throughput vs. n_{max} on various network conditions.

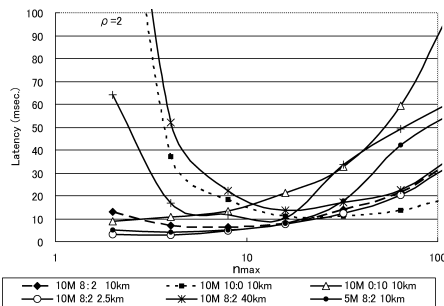


図 11 種々ネットワーク条件での遅延時間の上限 CA スロット数 n_{max} 特性

Fig. 11 Latency vs. n_{max} on various network conditions.

基準値として採用した次第である。

4. む す び

Synchronous CSMA/v-MCA 方式の性能をさらに引き出すべく、上りチャネルの空き時刻を SCH が予測し、同時刻を目標として CA フレームや MAC フレームを先行送信させる Flying S-CSMA/v-MCA 方式の提案を行った。理論計算とシミュレーションにより、40 km のネットワーク長で 2 倍以上の高スループット特性が得られるなど、その有効性を示した。さらに、SCH が CA 手続きの際に設定しうる上限スロット数について考察し、スループットの改善と遅延時間抑制の観点から、本システムが対象としているネットワーク環境領域での適正な上限スロット数は、10~50 の範囲内にあることを明らかにした。

今後の課題としては、すべてのフレームを対象に先行送信させることによってネットワーク長に依存しない理想的な性能の実現が期待されるフルフライング送信方式（フライング方式 3）の検討や、VoIP などのリアルタイム通信サービスに適した QoS 制御の導入などがあげられる。デジタルデバイド解消に向けて、さらなる方式改良に取り組んでいく所存である。

参 考 文 献

- 1) ANSI/IEEE Standard 802.16-2004, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems (Oct. 2004).
- 2) 小林 浩, 小澤和義, 嘉村幸一郎, 森谷 修: PTMP 型アクセスネットワークにおける Synchronous CSMA/CD, 電子情報通信学会論文誌, Vol.85-B, No.4, pp.471-479 (2002).
- 3) Data-over-Cable Service Interface Specifications, Cable Modem Termination System Network Side Interface Specification, SP-CMTS-NSII01-960702, MCNS holding, L.P. (1996).
- 4) Data-over-Cable Service Interface Specifications, Cable Modem to Customer Premise Equipment Interface Specification, SP-CMCI-101-960702, MCNS Holdings, L.P. (1996).
- 5) Tannenbaum, A.S.: *Computer Networks, 4th Edition*, pp.259-265, Prentice Hall (2003).
- 6) Peyravi, H.: Medium Access Control Protocols Performance in Satellite Communications, *IEEE Communications Magazine*, pp.62-71 (Mar. 1999).
- 7) ANSI/IEEE Standard 802.11, 1999 Edition Part.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (1999).
- 8) 森谷 修, 小林 浩: PTMP 型アクセスネットワークにおける Synchronous CSMA/MCA with Multiple CA による衝突確率の低減, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.3 (2003).
- 9) 森谷 修, 小林 浩: PTMP 型アクセスネットワークにおける Synchronous CSMA/MCA 方式の衝突回避スロットの可変性, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.8 (2003).
- 10) 森谷 修, 森 靖, 小林 浩: Flying S-CSMA/v-MCA 方式を用いたブロードバンドワイヤレスネットワークの特性評価, 電子情報通信学会技術報告, NS2005-17, pp.21-24 (Aug. 2005).

(平成 18 年 9 月 12 日受付)

(平成 19 年 1 月 9 日採録)



森谷 修 (正会員)

平成 2 年早稲田大学理工学部電気工学科卒業, 平成 4 年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程修了, 同年 (株) 東芝入社. 移動通信システムのアクセス方式, セキュリティゲートウェイシステム, 広帯域移動アクセス通信システム, マイクロ波半導体の研究開発に従事. 電子情報通信学会, 電気学会各会員.



小林 浩 (正会員)

昭和 45 年東京工業大学工学部電気工学科卒業. 同年 (株) 東芝入社. 昭和 48 ~ 52 年宇宙開発事業団へ出向. 平成 14 年東京電機大学情報環境学部. 人工衛星搭載機器, 人工衛星軌道解析プログラム, ロケット慣性誘導システム, 大容量分散型電子交換システム, OA システム, 無線 LAN, ATM 交換方式, 広域ブロードバンド・アクセスネットワーク, ディペンダブルネットワーク, 学習支援システム等の研究開発に従事. 『インターネット総論』(共著, 共立出版) ほか. 工学博士. 電子情報通信学会, IEEE, 日本教育工学会各会員.



森 靖

平成 17 年東京電機大学情報環境学部情報環境工学科卒業. 平成 19 年同大学大学院情報環境学研究科修士課程修了. 在学中, 主としてトラフィック分析, ならびに広域ブロードバンド・ワイヤレスネットワークに関する研究に従事. 電子情報通信学会学生会員.



高橋 武宏

平成 18 年東京電機大学情報環境学部情報環境工学科卒業. 現在, 同大学大学院情報環境学研究科修士課程在学中. 広域ブロードバンド・ワイヤレスネットワーク, QoS 制御に関する研究に従事. 電子情報通信学会学生会員.