

PTMP 型アクセスネットワークにおける Synchronous CSMA with Multiple CA による衝突確率の低減

森 谷 修[†] 小 林 浩^{††}

Synchronous CSMA/CD 方式のネットワーク長および負荷トラフィックの増大にともなうアクセスの集中化を回避すべく、synchronous CSMA with multiple CA 方式を開発した。ポイントは、ネットワークが仮想的に n 本存在するように見せかけることによって、衝突発生確率を低減し、スループット特性の改善を図ろうとすることにある。その結果、CSMA 系アクセス方式の特徴である低アクセス遅延特性を維持しつつ、アクセスの分散化に顕著な効果があり、synchronous CSMA/CD 方式はもとより従来の CSMA/CD 方式をも凌ぐ高い潜在能力を有することが明らかになった。同方式の潜在能力を最大限に引き出すためには、さらなる課題克服が必要である。

Colliding Probability Reduction by Synchronous Carrier Sense Multiple Access with Multiple Collision Avoidance for Point to Multipoint Access Networks

OSAMU MORIYA[†] and HIROSHI KOBAYASHI^{††}

A synchronous CSMA/MCA system has been developed for avoiding access concentration due to the expansion of network length and offered traffic in the synchronous CSMA/CD system. This type of network works so as to consist of plural networks virtually, in order to reduce the probability of colliding with keeping low access delay, and therefore improves overall performance. The proposed system shows remarkable effects on dispersing access concentration and thus realizing higher potentiality than not only a synchronous CSMA/CD system but also conventional CSMA/CD systems. Further improvements are necessary for enhancing its potentiality.

1. ま え が き

近年、ADSL やケーブルモデムを用いた常時接続型の高速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くる。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合う新たなアクセス方式の開発が必要である¹⁾。

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合う PTMP (Point-To-MultiPoint) 型アクセスネットワークにおける 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),3)}。

特に、アクセス遅延時間が少ないことは、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

[†] 株式会社東芝 e-ソリューションズ社
e-Solution Company, TOSHIBA Corporation

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

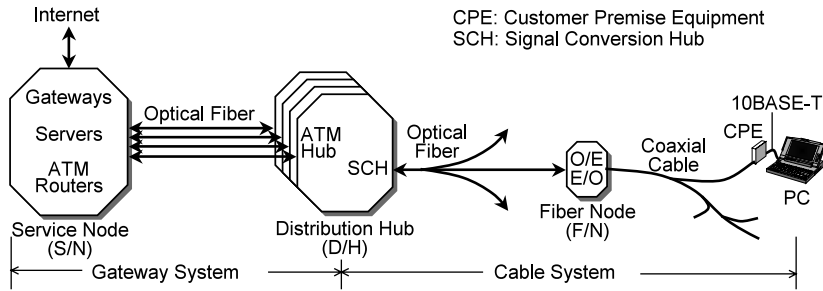


図1 HFCを利用した高速インターネットアクセスサービスの構成例

Fig. 1 System configuration of high-speed Internet access services on HFC.

も適応しやすいことを意味する。

HFC で多用されている DOCSIS (Data-Over-Cable Service Interface Specifications^{9),10}) のように、2~4 msec 程度の予約周期の中で予約手続きを行う方式にはない特徴といえよう。

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特性を持っている。提案する Synchronous CSMA with Multiple Collision Avoidance (以下、S-CSMA/MCA と略) 方式は、低アクセス遅延時間を維持しながら、前者の要因の排除、すなわち複数の衝突回避 (CA) 用スロットを設けることによって、アクセスを分散化し衝突発生確率を低下させ、スループット特性の改善を図ろうとするものである。

以下、提案方式実現のベースとなる PTMP 型ネットワークの特徴、従来方式の概要とその課題を整理した後、提案方式の概要とその理論的根拠について論じ、さらに複数の実装例を用いたシミュレーションにより方式の有用性を評価する。最後にデジタルデバインド解消に向けた今後の研究開発課題について言及する。

2. PTMP 型ネットワークと Synchronous CSMA/CD 方式

2.1 PTMP 型ネットワークの概要とその特徴

本論文で対象とするネットワークは PTMP 型と呼

ばれるもので、HFC や FTTH (Fiber To The Home) などの有線ネットワーク、あるいはマイクロ波帯やミリ波帯を利用した加入者無線アクセスネットワークなどがあげられる。たとえば、HFC は図 1 のような構成からなるが、その詳細は文献 4) に委ねることとし、ここでは概要を述べるにとどめる。

サービスノード (S/N) はたとえば半径 100 km 程度のサービスエリアに対して 1 か所設けられ、これを 10 分割した半径 30 km 程度のサブサービスエリアには分配ハブ (D/H) が配置されている。D/H 内の信号変換を兼ねたハブ装置 (SCH) の先に光ファイバおよび O/E、E/O 変換を行うファイバノード (F/N、FWA では見通し外エリア用のアンテナも) が接続される。F/N の先の長さ 1~5 km 程度の同軸ケーブルに複数の加入者装置 (CPE) が収容され、さらに CPE には LAN で多用されている 10BASE-T インタフェースを介してパソコン (PC) が接続される。

一般に、S/H や D/H は空調が施された建物に、F/N は空調設備のない電柱や道路の縁石などに設置されるが、この構成は都市部のみならず郊外や過疎地にも、またいろいろな伝送媒体にも適用可能な PTMP 型ネットワークとしての一般性を有している。なお、ここでは D/H を境にサービスノード側 (S/N - D/H 間) をゲートウェイシステム、加入者側 (D/H - CPE 間) をケーブルシステムと呼ぶこととする。

PC からのインターネットへのアクセス情報は、CPE で暗号化、誤り訂正符号化などが施された後、変調信号として上り周波数帯域変調伝送路に送信される。同軸ケーブルを経て F/N に到達した信号は、変調信号のまま E/O 変換され、光ファイバを経て SCH に到達する。SCH で復調、平文に戻された後、他の SCH を経由して送られてきた情報とともに ATM 多重化装置によって ATM 多重されて S/N にベースバンド伝送される。S/N では ATM スイッチやルータを介してコンテンツ配信サービスや電子メールサービスなどを提供

無線などの劣悪な伝送環境では、ビット誤りやバースト誤りによるバケット抜けが起きやすい。バケット抜けが頻発すると、送信側ではネットワーク内で輻輳が生じたと思われ、TCP 輻輳ウィンドウ制御を行ってウィンドウサイズを縮めがちになり、エンドユーザは伝送媒体の持つ伝送能力を最大限に利用できなくなる。この解決策の 1 つは、小さなウィンドウサイズでも高速広帯域通信が行えるようにネットワーク内の遅延時間を小さくすることである。

する各種サーバ群、もしくはゲートウェイを介してインターネットに送られる。一方、サーバ群やインターネットから送られてきた情報は、所定の信号変換が加えられながらゲートウェイシステムならびにケーブルシステム上を逆の経路をたどり、アクセス元の PC に届けられる。

上り方向は複数の CPE からの情報送信が競合し合うため、ケーブルシステム内で何らかのアクセス制御が必要になる。一方、下り方向はゲートウェイシステム内で競合制御が行われ、ケーブルシステム内では競合は発生しない。したがって、本論文はケーブルシステム内の上り方向の所謂コリジョンドメインを検討対象とする。

ところで、PTMP 型ネットワークは、対等分散型制御を基本とする 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ことになっている。これに対して、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（常時送信される下り信号から同期タイミングを抽出すれば、1/10 ビット程度の位相ずれに）制御することができる^{6),7)}。この特徴を活かすことによって、対等分散を基本とする LAN の世界では考えられなかったアクセス方式や特性の実現が可能になる。

2.2 Synchronous CSMA/CD 方式

S-CSMA/CD 方式の骨子は、(a) SCH への上り MAC フレームの到着を所定のタイミングに同期させる、(b) SCH での MAC フレームの受信レベルを等しくさせる、(c) SCH は上り伝送路上のアクセス状態（キャリアの有無、衝突発生）を監視し、下り伝送路を介して頻繁に表示することにある。その結果、衝突発生の際、衝突する MAC フレームは必ずその先頭から衝突状態に突入する、換言するならば、MAC フレームの長さあるいはネットワーク長に依存することなく、CSMA/CD 方式が成り立つ上での必要条件である“100%衝突検出”を実現するものであった。

しかしながら、この方式では、SCH が上り伝送路上にキャリアがなくアクセスを許可する旨を下り伝送路を介して表示し、これを受けて CPE が上り MAC フレームを送信し SCH に到着するまでの少なくとも 1 往復伝播遅延時間が、アクセス許可表示ごとに介在することになる。これによるシステム性能への影響はネットワーク長が長くなるほど顕著になることはいままでもないが、負荷トラヒックが増えるほど、MAC フレームの送信や衝突発生時の処理に費やされる時

間間が増えるため、よりアクセスの集中化を招き衝突発生確率が增大するとともに、上述の往復伝播遅延時間の間は上りペイロードの送信を行えない、すなわち上りのネットワーク資源を浪費するためにスループット特性の著しい劣化をもたらす。ちなみに、文献 3) で示された評価モデルでは、最大ネットワーク長が 20 km, 40 km, 80 km のとき、低負荷トラヒック状態（規格化トラヒック=0.1）では、最大ネットワーク長 2.5 km のものに対して各々約 15%, 20%, 23% のスループットの劣化であるが、高負荷トラヒック（規格化トラヒック=1）では、各々約 23%, 39%, 57% も劣化している。

要すれば、広域での高速インターネットアクセスサービスを実現するには、少なくとも、何らかの方法でアクセスを分散化させ、衝突発生確率を低下させること、次いで往復伝播遅延時間中の時間的浪費を省き、上りネットワーク資源の利用効率を高めることが必要である。これら 2 つの課題は互いに異なる要因によるものであるため、当然その解決手段も異なったものになることは想像に難くない。こうした事情をふまえ、本論文は前者の課題に照準して、その具体的な解決を試みようとするものである。

3. Synchronous CSMA with multiple CA 方式

3.1 方式の概要

提案する S-CSMA/MCA 方式の骨子は、次のとおりである。

- (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、SCH が指定する複数個の衝突回避 (CA) スロットの中から 1 つをランダムに選択して CA フレームを送信し、該 MAC フレームの 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。

以下に提案方式の意味するところを考察する。(a) は、S-CSMA/CD 方式における同期方式と基本的な考え方は同じである。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 MAC フレームが他の信号と衝突しないように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、

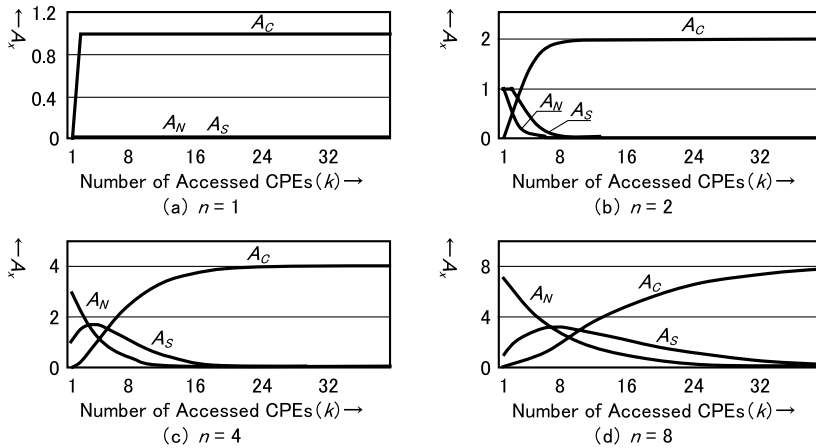


図2 Multiple CA の特性
 Fig. 2 Characteristics of multiple collision avoidance.

IEEE802.11 標準の無線 LAN における RTS/CTS 方式⁵⁾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 が手続きに成功した場合には、成功した CPE すべてについて MAC フレームの送信を促す、すなわち連続的にペイロードの転送を行うことによって、スループットの向上を図ろうとするものである。

換言するならば、提案方式の狙いは、CPE に対してアクセスネットワークが仮想的に n 本存在するように見せかけることにある。

3.2 Multiple CA

CA スロットの個数を n 、CA 手続きを同時に行う CPE 数を k 、さらに CPE は n 個のスロットの中から 1 つをランダムに選択してアクセスするものとする。CA フレームを受信しなかった CA スロットの平均個数 A_N 、CA フレームを 1 つだけ受信 (CA 手続き成功) した CA スロットの平均個数 A_S 、2 つ以上の CA フレームを受信 (CA 手続き失敗) した CA スロットの平均個数 A_C は、各々次式で表される。

$$A_N = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^k \times n \quad (1)$$

$$A_S = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{k-1} \times k \quad (2)$$

$$A_C = n - A_N - A_S \quad (3)$$

$n = 1, 2, 4, 8$ における A_N, A_S, A_C の関係を図 2 (a) ~ (c) に示す。

ここに $n = 1$ は、RTS/CTS 方式や、予約スロット

を ALOHA によりアクセスする RS-ISMA 方式⁸⁾などに見られる衝突回避用あるいは予約用に 1 個のアクセススロットを備えた方式に相当する。 $n > 1$ である S-CSMA/MCA 方式では、CA スロットへのアクセスが分散化され、アクセスされない CA スロット (A_N) が存在する代わりに、1 台の CPE のみがアクセス、すなわち CA 手続きに成功する CA スロット (A_S) と、さらに複数台の CPE が同じ CA スロットにアクセスし CA フレームどうして衝突するもの (A_C) が存在する。そして、 k が多くなるほど A_N は減少し、逆に A_C は増加するが、 A_S は k と n に依存するピーク値を持つ。この平均ピーク値 A_{Smax} は式 (4) によって表すことができ、さらにそのとき、スロットあたりの平均 CA 手続き成功確率 P_S は式 (5) によって表されるピーク値 P_{Smax} を持つ¹¹⁾。

$$A_{Smax} = n \times \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n-1} \Big|_{k=n-1, n} = A_N \Big|_{k=n-1} \quad (4)$$

$$1.0 \Big|_{n=1} > P_{Smax} = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n-1} > 0.368 \Big|_{n=\infty} \quad (5)$$

これは、同時アクセス数が CA スロット数より 1 つ少ないか同数となったときに P_S が最大になる、あるいは予想される同時アクセス数と同じ個数の CA スロットを用意すれば、少なくとも平均 36.8% 以上の CPE が CA 手続きに成功することを意味している。2 台以上の CPE が同時にアクセスすれば必ず衝突を起こしていた S-CSMA/CD 方式はもとより、従来の CSMA/CD 方式をも凌駕する高性能な CSMA 系アクセス方式が multiple CA の適用によって実現することが示唆されよう。なお、前述の DOCSIS のよ

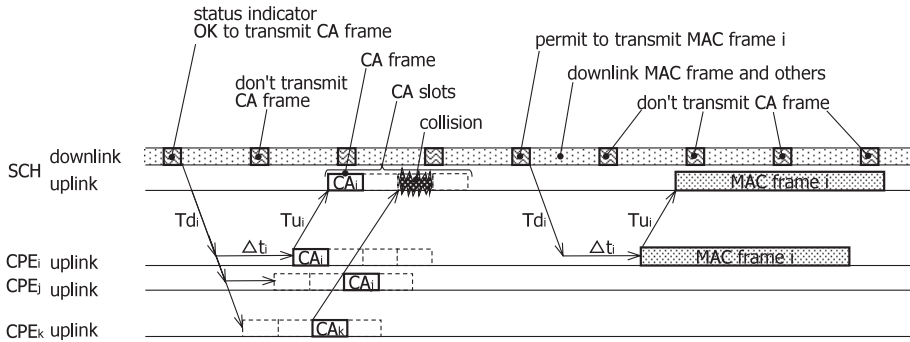


図3 S-CSMA/MCA方式の実装例と動作メカニズム
 Fig. 3 An implementation of S-CSMA/MCA system.

うに予約周期の中で複数個の予約スロットを設けたものや, adaptive tree walk protocolのように複数個設けた競合スロットを介して局間で何度か情報交換し合い競合を限定しようとするもの¹¹⁾が報告されているが, これらはいずれも本論文が目的とする長距離かつ劣悪な伝送環境に適用し難い方式であることを付記しておく.

3.3 方式の有効性評価

S-CSMA/MCA方式による衝突確率の低減に関する有効性を評価するために, 図3に示す実装例を用いて文献3)と同じ方法でシミュレーションを行った. 実装の要点は次のとおりである.

- ① CAスロットは n 個で一定とする.
- ② CAフレームには衝突検出用のランダムデータと誤り検査符号, MACフレーム長などが含まれる.
- ③ アクセス制御を行うための状態表示 (SI; Status Indicator) 信号には, CAスロットの個数やCAフレームの送信を指示する制御情報, さらにCAスロットへのアクセス結果をビットマップ形式で表示した制御情報などが含まれる. なお, 下りMACフレームを送信中にSI信号を挿入するが, CPEで取り除かれ, フレームの再組み立てが行われる.
- ④ CA手続きに失敗したCPEは, CAスロットを単位とする2乗バックオフ処理, すなわち m 回目の失敗を行ったCPEは, CAスロット区間 $[0, 2^m - 1]$ の中でランダムにCAスロットを選択して再度CA手続きを試みる.

図3に示す実装例 ($n = 4$) での具体的な動作メカニズムは, 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 T_{d_i} 後にCPE _{i} に到着する.
- 2) 送信すべきMACフレームを保有していた

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 t_i (最大伝播遅延時間から $(T_{d_i} + T_{u_i})$ を差引いた値) でCAフレームを送信すると, 上り伝播遅延時間 T_{u_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する. 1番目のスロットに到着したCPE _{i} のCAフレームからは誤りが検出されなかったため, CA手続き成功と判定される. これに対して, CPE _{j} とCPE _{k} が送信した3番目のスロットでは誤りが検出され, CA手続き失敗と判定される.
- 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3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 (t_i) で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.

この例では, CA手続きに成功したCPEは1つだけであったが, 複数のCPEが成功していれば, ビットマップ形式によるアクセス結果表示から該当する

表1 シミュレーションにおける主要パラメータ
Table 1 Key parameters on computer simulations.

Parameters	Values
Transmission Speed	10 Mbps (downlink and uplink)
Interval of SI signal	25.6 μ sec
CA flame length	64 bits
MAC flame length	Short : 64 bytes, long : 1518 bytes
Number ratio of short to long MAC flames	Short : long = 8 : 2
Number of CA slots	Fig.4 to 7 : 4 Fig.8 to 10 : 1, 2, 4, 8, 16, 32
Length of SI signal	64 bits
Network length	2.5 km, 10 km, 20 km, 40 km, 80 km

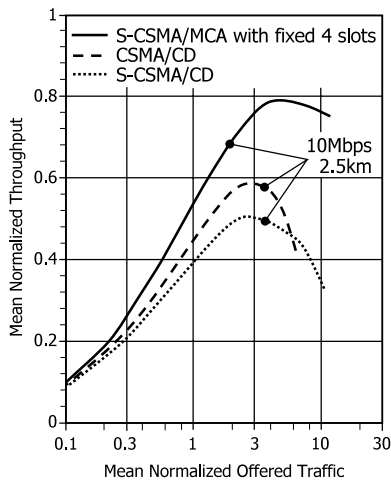


図4 3つの競合型アクセス方式のスループット比較
Fig. 4 Mean throughput vs. offered traffic on three contention-based access systems.

CPEはMACフレームの送信順序を知ることができ、連続的な送信が行われることは前述したとおりである。図3の実装例($n=4$)について実施したシミュレーションの主要パラメータとその評価結果を表1および図4~7に示す。

まず図4は、ネットワーク長2.5kmについて、CSMA/CD方式、S-CSMA/CD方式、S-CSMA/MCA方式のスループット特性(物理伝送速度にて規格化)を比較したものである。同図からS-CSMA/MCA方式は他の2方式よりもスループット特性の立ち上がり早く、高スループットを示していることが分かる。ちなみに、規格化負荷トラフィックが0.3~1の範囲では、S-CSMA/MCA方式はCSMA/CD方式に対して13~15%、S-CSMA/CD方式に対して21~24%の改善効果をも、またピーク値では各々26%、36%の改善効果を確認することができる。

なお、CSMA/CD方式とS-CSMA/CD方式は、ほぼ同じ負荷トラフィックにてスループットがピークに達

しているが、S-CSMA/MCA方式はより高負荷トラフィックでピークに達している。これは後述するように、CAスロットの複数化によって、スループット特性を高負荷まで伸ばせることを意味している。

また、図5は種々のネットワーク長について、S-CSMA/MCA方式のスループット特性をS-CSMA/CD方式との対比を含めて示したものである。同図から、ネットワーク長が増大するほどS-CSMA/CD方式と同様にスループット特性は劣化し、かつそのピークは低負荷側に移動するが、S-CSMA/CD方式に対する性能の優位さはより拡大していることが分かる。

図6はCA手続きごとの平均同時アクセス数(CPE数)をプロットしたものである。同図より、平均同時アクセス数は、ネットワーク長が2.5kmの場合は負荷トラフィック1.0の高負荷においても0.5程度と少ないが、ネットワーク長が80kmの場合は負荷トラフィック0.5程度でもCAスロット数(=4)を超えてしまう。これは、衝突がないときの平均パケット転送時間(短パケット数:長パケット数=8:2)と2.5kmでの往復伝播遅延時間がほぼ同じであるのに対して、80kmでは往復伝播遅延時間が20倍以上にもなるためである。冒頭に述べた往復伝播遅延時間の介在によるアクセスの集中化が、いかに激しいかが理解されよう。同時に、負荷トラフィックだけでなくネットワーク長によってもCAスロットが過剰になったり、あるいは不足したりすることがありうる。ことが分かる。

そして、同図と図5とを見比べると、平均同時アクセス数が5となる負荷トラフィック近傍で、スループット特性はピーク値に達していることが分かる。これは

文献3)では、S-CSMA/CD方式のスループットは図4、5より良好な特性を示しているが、これは伝送速度が2Mbpsと低速なためである。なお、S-CSMA/CD方式では、伝送速度とネットワーク長は反比例の関係にあり、伝送速度を m 倍にする代わりにネットワーク長を $1/m$ 倍にすれば、ほぼ同じスループット特性を示す。

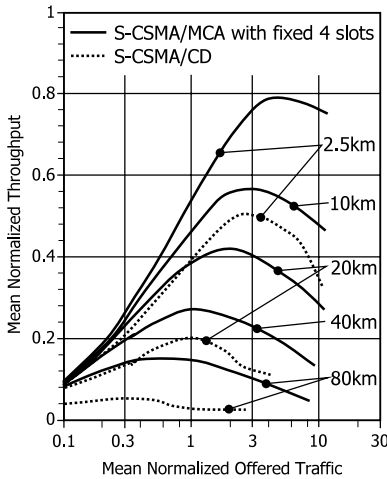


図5 S-CSMA/MCA方式とS-CSMA/CD方式のスループット特性比較
 Fig. 5 Mean throughput vs. offered traffic on S-CSMA/MCA and S-CSMA/CD systems.

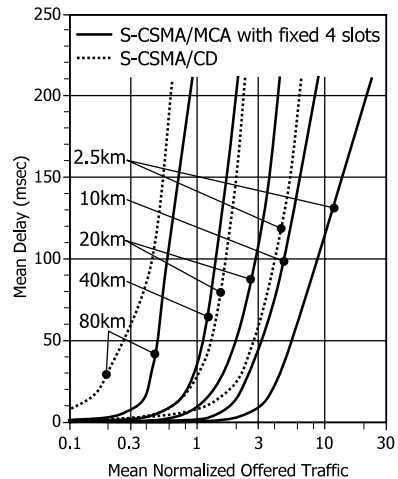


図7 S-CSMA/MCA方式とS-CSMA/CD方式のアクセス遅延時間特性比較
 Fig. 7 Mean access delay vs. offered traffic on S-CSMA/MCA and S-CSMA/CD systems.

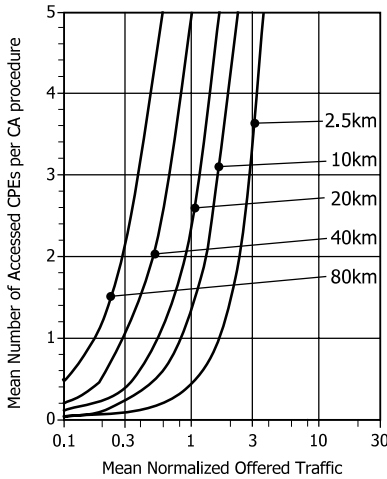


図6 S-CSMA/MCA方式におけるCA手続きあたりのCPEアクセス数
 Fig. 6 Mean number of accessed CPEs vs. offered traffic on S-CSMA/MCA systems.

前述した同時アクセス数がCAスロット数より1つ少ないか同数となったときに、スロットあたりの平均CA手続き成功確率 P_s が最大になるとほぼ符合している。換言するならば、CAスロット数の増減によってスループット特性(ピークの位置)を自由に成形できるようになるため、負荷トラヒックが1を超えるような過負荷状態でも、ただちに輻輳状態に陥らないようにするなど、ネットワーク運用上の安定性を高めるうえで有効な方式になりうることを示唆している。

さらに、図7のアクセス遅延時間特性について見ると、前述の予約周期を持つアクセス方式では低負荷状

態でも4~6 msec程度のアクセス遅延時間を持つことが多いが、この遅延時間はS-CSMA/MCA方式20 kmでは正規化負荷トラヒックが1程度のときに相当する。そして、高負荷時にはS-CSMA/CD方式より遅延時間が減少していることが確認できる。S-CSMA/MCA方式ではCA手続きに2往復伝播遅延時間を費やすにもかかわらず、衝突回避動作を含めた総遅延時間が改善されるのは、衝突発生確率の低減による遅延時間の削減効果がCA手続きでの遅延を補って余りあるためと考えられる。

一方、図8~10は、6種類のCAスロット数($n=1, 2, 4, 8, 16, 32$)についてのシミュレーション結果を示したものである。図8はネットワーク長10 kmについて、CAスロット数によるスループット特性の変化の様子を表したもので、CAスロット数が増えるほどスループットのピーク値がより高負荷側に移動し、かつ平坦、すなわち過負荷状態でも高スループットを維持することが分かる。

さらに、2.5 kmと40 kmのネットワーク長についても同様のシミュレーションを行い、CAスロット数に対するスループットのピーク値と規格化負荷トラヒック1.0におけるスループットの変化をプロットしたのが図9である。同図によれば、CAスロット数1から4ないし6付近まではスループット特性は大きく改善されるが、その後はCAスロット数の増加にともなう改善は鈍くなる。またピーク値について見るならば、ネットワーク長が短いほどこの傾向は強い。換言すれば、CAスロット数の増加によるスループット特性の

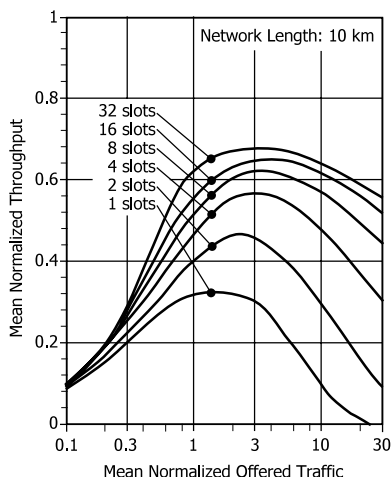


図 8 S-CSMA/MCA 方式における種々の CA スロット数でのスループット特性

Fig. 8 Mean throughput vs. offered traffic and number of CA slots on S-CSMA/MCA systems.

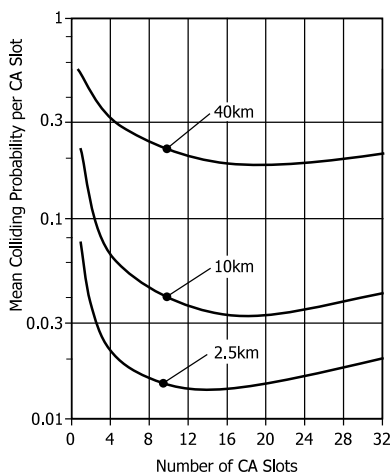


図 10 S-CSMA/MCA 方式における CA スロット数とネットワーク長、衝突発生確率の関係

Fig. 10 Mean colliding probability per CA slot vs. number of CA slots and network length on S-CSMA/MCA systems.

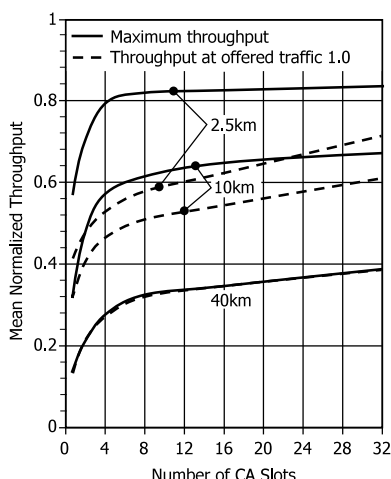


図 9 S-CSMA/MCA 方式における CA スロット数とネットワーク長、スループット特性の関係

Fig. 9 Mean throughput vs. number of CA slots and network length on S-CSMA/MCA systems.

改善効果は、ネットワーク長が長いほど大きいことが分かる。

これに対して、規格化負荷トラフィック 1.0 では、ネットワーク長によらずほぼ同じ改善効果、すなわち CA スロット数が 6 程度までの大きな改善効果に加えて、これより増やした場合にも相応の効果が持続することが分かる。これは規格化負荷トラフィックが 1.0 以下の通常の運用状態では、スループット特性の改善という視点から見れば、CA スロット数を増やすほど改善効果が期待できることを意味している。

しかしながら、図 10 に示す規格化負荷トラフィック 1.0 における CA スロット数と CA スロットあたりの衝突発生確率の関係を見ると、CA スロット数が 8 程度までは急激に衝突発生確率は低減するものの、CA スロット数が 14~20 の付近で最小となり、逆にこれより CA スロット数が増えると、衝突発生確率が増加し始めることが分かる。CA スロット数が多くなりすぎると、1 回の CA 手続きあたりの手続き成功 CPE 数が増え、これらの CPE による MAC フレームの連続送信時間が増える。すなわち CA 手続き間隔が長くなり、この間に生起する MAC フレームの送信要求数（アクセス数）が増え、その結果、CA スロットあたりのアクセス数の増加、ひいては衝突発生確率の増加を招いているためと考えられる。衝突発生確率を低減しようとする視点からは、必ずしも CA スロット数を単純に増やすことが好結果をもたらすことにはならないことが示唆されよう。

4. 今後の研究開発課題

前述したように本研究が目指すところは、デジタルデバインド解消のために、数 10 km にも及ぶ広範なエリアで伝送媒体を効率良く共有し合う新たなアクセス方式を開発することにある。PTMP 型ネットワークの特徴を活かした S-CSMA/MCA 方式は、これに応える高い潜在能力を有するものであるが、その能力を最大限に引き出すためには、さらに以下のような課題を克服する必要がある。

A) CA スロット数の可変性 S-CSMA/MCA 方式

を適用したアクセスネットワークを運用するには、ネットワーク長に応じて適切な CA スロット数を設定する必要がある。過剰に設定すればネットワーク資源を固定的に浪費するばかりか、CA スロットあたりの衝突発生確率を高めることになる。逆に、少なすぎても衝突発生確率が高くなり、ネットワーク資源を効率良く利用することができない。これは、ネットワークの構築や構成変更ごとに、運用管理者は適正な個数を算出し設定するなどの煩雑な作業を行わなければならないことを意味する。負荷トラヒックに応じて CA スロット数を適応的に変えられれば、運用管理者に煩雑な作業を強いることなく、ネットワークをつねに適切な状態で運用することが可能になろう。実現にあたっては、負荷トラヒック（同時アクセス数）の予測方法と CA スロット数の設定方法の確立がポイントとなる。

- B) ネットワーク資源のさらなる利用効率の向上 前述したように、S-CSMA/MCA 方式では CA 手続きを経て送信された MAC フレームを SCH が受信するまでに 2 往復伝播遅延時間を費やす。この間は上りペイロードの送信に利用していないため、上りのネットワーク資源を浪費していることになる。SCH は上り MAC フレーム長を事前に把握しておくことができる。したがって、MAC フレームが伝送路から消滅する時刻を見込んで早めに CA 手続きを開始（以後“フライングスタート”と呼ぶ）すれば、ネットワーク資源の利用効率を高めることができよう。ネットワークが長いほど、また高負荷であるほど、フライングスタートの効果は大きくなる。実現にあたっては、フライングスタートの対象（CA フレームと MAC フレーム）や、MAC フレーム送信中の CPE に対する送信の一時中断など、いろいろな実装方法が考えられ、かつ複雑なアクセス制御が絡むことになる。実装の簡便さと性能追及とのバランスとりが課題となろう。
- C) SI 信号の適応制御化 上述の実装例では、SI 信号は $25.6 \mu\text{sec}$ ごとに送信されていたが、これを CA 手続きの開始時や MAC フレームの送信許可時など、必要になったときに必要な制御情報のみを適応的に送信するようにすれば、上りおよび下り双方のスループット特性を改善することになる。実現には下り信号の中でユーザ情報と SI 信号の識別、SI 信号の可変長化などの課題を克服する必要がある。

D) バックオフ処理の最適化 上述の実装例では、便宜上 CSMA/CD 方式で用いられているバックオフに準じた処理を適用したが、SCH によるフロー制御の適用など、S-CSMA/MCA 方式に適した処理方法の確立も課題である。

E) その他 音声や動画などのリアルタイムトラヒックに適した遅延時間揺らぎの少ない QoS 制御に向けた CA 手続きの拡張や、ギガビット級アクセスネットワークの実現、さらには無線系あるいはモバイル系への拡張なども今後の研究課題といえよう。

5. む す び

S-CSMA/CD 方式のネットワーク長および負荷トラヒックの増大に起因するアクセスの集中化を回避すべく S-CSMA/MCA 方式を提案した。Multiple CA の特性について解析的な考察を加えた後、実装例を用いて提案方式の性能評価を行った。その結果、課題であったアクセスの分散化、すなわち衝突発生確率の低減に顕著な効果があり、従来の CSMA/CD 方式をも凌ぐ高い潜在能力を有することを明らかにした。しかしながら、CA スロット数が多すぎると、意図に反して CA スロットあたりの衝突発生確率を高めかねないことも明らかになった。最後に、同方式の潜在能力を最大限に引き出すためには、さらにいくつかの課題克服が必要なことを述べた。

デジタルデバインド解消のために、S-CSMA/MCA 方式による理想的な CSMA 系アクセス方式の確立を図るべく、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) 小林 浩, 江崎 浩: インターネット総論, pp.69-75, 共立出版 (2002).
- 2) 小林 浩: 情報システム, このシステムで使用する中央情報通信制御装置及び情報通信装置, 情報伝送方式並びに変調方法, 特願平 7-023012, USP6,256 (1995).
- 3) 小林 浩, 小澤和義, 春山秀朗, 森谷 修: PTMP 型アクセスネットワークにおける Synchronous CSMA/CD, 信学論 (B), Vol. J85-B, No.4, pp.471-479 (2002).
- 4) Vecchi, M.: Evolution of hybrid fiber/coax networks, *Annual Review of Communication*, Vol.49, pp.681-685, International Engineering Consortium (1996).
- 5) ANSI/IEEE Standard 802.11, 1999 Edition Part.11: Wireless LAN Medium Access Con-

trol (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (1999).

- 6) 小林 浩, 春山秀朗, 広瀬次広: ツリー形マルチメディアネットワークにおける伝播遅延時間計測を施した TDMA 即時系サービス, 信学論 (B), Vol.J69-B, No.10, pp.1083-1091 (1986).
- 7) 小林 浩, 春山秀朗, 広瀬次広: 衝突検出に振幅情報を用いた広帯域 LAN CSMA/CD, 信学論 (B), Vol.J69-B, No.12, pp.1607-1615 (1986).
- 8) Wu, G., 井上真杉, 村上 誉, 長谷良裕: 38 GHz 帯の 156 Mbps 超高速無線 LAN 試作システム, 通信総合研究所季報, Vol.47, No.4, pp.23-33 (2001).
- 9) Data-Over-Cable Service Interface Specifications, Cable Modem Termination System Network Side Interface Specification, SP-CMTS-NSII01-960702, MCNS Holdings, L.P. (1996).
- 10) Data-Over-Cable Service Interface Specifications, Cable Modem to Customer Premise Equipment Interface Specification, SP-CMCI-101-960702, MCNS Holdings, L.P. (1996).
- 11) Tanenbaum, A.S.: *Computer Networks*, Forth Edition, pp.259-265, Prentice Hall (2003).

(平成 14 年 7 月 1 日受付)

(平成 15 年 1 月 7 日採録)



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。同年東京芝浦電気(株)入社。昭和 48 年から昭和 52 年までの間宇宙開発事業団へ出向。現在、東京電機大学情報環境学部所属。人工衛星搭載電子機器、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、小容量構内電子交換機、大容量分散型電子交換システム、広帯域ツリー形マルチメディアネットワーク、OA システム、OA フロア、最適網設計ツール、無線 LAN、ATM 交換方式、高速インターネットアクセスシステム、加入者系無線アクセスシステムの研究開発に従事。「OA 概論」(共著、共立出版)、「インターネット総論」(共著、共立出版)。電子情報通信学会、IEEE 各会員。工学博士。



森谷 修 (正会員)

昭和 41 年生。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。現在(株)東芝 e-ソリューション社通信システム事業部所属。移动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の研究開発に従事。電子情報通信学会、電気学会各会員。